

Eine Methode zur Erfassung der Bewegungscharakteristik von Schaltlichtbögen in Vakuumschaltröhren durch Messung der äußeren Magnetfeldverteilung

Vom Fachbereich 18
- Elektrotechnik und Informationstechnik -
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

Dipl.-Ing. Thomas Frederik Rettenmaier
geboren am 12. April 1980 in Heidelberg

Referent: Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

Tag der Einreichung: 10. 07. 2015
Tag der mündlichen Prüfung: 05. 02. 2016

D17
Darmstadt 2016

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2009 bis 2014 während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Für die Ermöglichung dieser Arbeit sowie für das in mich gesetzte Vertrauen, welches mir ermöglichte, eigenverantwortlich einen großen Gestaltungsspielraum zu nutzen, gilt dem Leiter des Fachgebietes, Herrn Professor Dr.-Ing. Volker Hinrichsen, mein besonderer Dank.

Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Kurrat möchte ich für die Übernahme des Korreferates und den sehr freundlichen Kontakt danken.

Diese Arbeit wurde von der Siemens AG unterstützt, der ich an dieser Stelle danken möchte. Im Besonderen gilt mein Dank Herrn Dr. Erik Taylor für die zahlreichen Gespräche, Ratschläge und Hinweise.

Im Laufe der Jahre waren zahlreiche studentische Arbeitskräfte in das Projekt eingebunden, die als Hilfwissenschaftler an der Pflege, Wartung und Modifikation der umfangreichen Anlagen des synthetischen Prüflabores beteiligt waren. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen diesen Studenten für ihren Einsatz und ihre Unterstützung bedanken.

Ebenfalls hatte ich die Möglichkeit, vier Masterarbeiten sowie fünf Bachelorarbeiten zu betreuen. Die im Rahmen dieser studentischen Abschlussarbeiten gewonnenen Ergebnisse waren mir eine große Hilfe und haben zum Gelingen dieser Arbeit erheblich beigetragen. Daher möchte ich mich an dieser Stelle für die geleistete Arbeit bedanken. Im Besonderen möchte ich Herrn Andreas Elben und Herrn Florian Brabetz für ihre freundschaftliche, kreative und erfolgreiche Zusammenarbeit im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten sowie ihrer Tätigkeit als Hilfwissenschaftler danken.

Ebenfalls möchte ich der Werkstatt des Fachgebietes für die Unterstützung bei Entwurf und Anfertigung von Laboraufbauten aller Art danken. Meinen ehemaligen Arbeitskollegen am Fachgebiet Hochspannungstechnik möchte ich für das sehr angenehme Arbeitsklima danken, welches von einer freundschaftlichen Atmosphäre, kreativen Diskussionen und ausgeprägter Hilfsbereitschaft geprägt war.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Verzeichnis der Formelzeichen, Konstanten und Abkürzungen	vii
Abstract	xi
Kurzfassung	xiii
1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1. Der Vakuumleistungsschalter - Aufbau und Fertigung	3
2.2. Der Schaltlichtbogen	6
2.3. Beeinflussung des Schaltlichtbogens durch die Gestaltung des Kon- taktsystems	12
2.3.1. Kontaktmaterial	13
2.3.2. Plattenkontakte	14
2.3.3. Radialmagnetfeldkontakte	14
2.3.4. Axialmagnetfeldkontakte	16
2.4. Übliche Prüftechnik und Laborausstattung	18
3. Zielsetzung der Arbeit	21
4. Das Messprinzip	25
5. Detektion der Lichtbogenbewegung mit Feldspulen	29
5.1. Wirkungsweise des Messsystems	29
5.2. Aufbau des Messsystems	31
5.3. Mathematische Betrachtung	34
5.4. Messsystemspezifische Fehlereinflüsse	45
5.4.1. Die effektive Spulenfläche	45
5.4.2. Elektromagnetische Beeinflussung (EMB)	49
5.4.3. Bandbreitenbegrenzung	49
5.5. Analyse und Nutzen des Messsystems	50
6. Detektion der Lichtbogenbewegung mittels Hall-Sensoren	53
6.1. Aufbau des Messsystems	54

6.2.	Aufbauspezifische Fehlereinflüsse	60
6.2.1.	Sensormodul	60
6.2.2.	Stromregler	61
6.3.	Aufbereitung und Interpretation der Messergebnisse	62
6.4.	Mathematische Betrachtung	69
6.4.1.	Modellierung des Lichtbogens	71
6.4.2.	Modellierung der Strompfade durch die Kontaktscheiben . . .	73
6.4.3.	Modellierung der starren Strompfade	75
6.4.4.	Addition der Flusssichten aller betrachteter Strompfade . . .	76
6.5.	Ermittlung der Lichtbogenposition	78
6.6.	Messtechnische Überprüfung der mathematischen Nachbildung	83
6.6.1.	Messungen an einer statischen Elektrodenanordnung	83
6.6.2.	Messung an einer kommerziellen Vakuumröhre	87
7.	Messprinzip bedingte Fehlereinflüsse	93
7.1.	Einfluss der induzierten Wirbelströme auf das magnetische Außenfeld	93
7.1.1.	Das Simulationsmodell	94
7.1.2.	Die Simulationsergebnisse	100
7.1.3.	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten	103
7.2.	Einfluss der Kontaktgeometrie auf das magnetische Außenfeld	106
8.	Untersuchungen unter Verwendung des Spulen-basierten Messsystems	111
8.1.	Gliederung der Messreihen	112
8.1.1.	Untersuchungsobjekte	112
8.1.2.	Durchgeführte Messreihen	113
8.2.	Messergebnisse	114
8.2.1.	Identifikation der Lichtbogenbewegung	114
8.2.2.	Lichtbogenbewegung mit zunehmendem Verschleiß	115
8.2.3.	Ausfallverhalten	118
9.	Untersuchungen unter Verwendung des Hall-Sensor- basierten Messsystems	121
9.1.	Einteilung der identifizierten Lichtbogenzustände	121
9.2.	Gliederung der Messreihen	125
9.3.	Messergebnisse	126
9.3.1.	Anlaufbereiche des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche . .	126
9.3.2.	Beginn und Ende der Lichtbogenbewegung in Abhängigkeit der Stromhöhe und des Kontakthubes	128
9.3.3.	Separate Betrachtung von Strom und Kontakthub	132
9.3.4.	Betrachtung der im Lichtbogen umgesetzten Ladung	136
10.	Zusammenfassung	141
11.	Ausblick	147

A. Anhang	151
Messprinzip-bedingte Fehlereinflüsse	151
Untersuchungen unter Verwendung des Hall-Sensor-basierten Messsystems	154
Der synthetische Prüfkreis	162
Literaturverzeichnis	167
Eigene Publikationen	175
Betreute Diplom-, Master-, Studien- und Bachelorarbeiten	177
Lebenslauf	179

Verzeichnis der Formelzeichen, Konstanten und Abkürzungen

Liste der Formelzeichen

a	m	Abstand des Sensors zum Mittelpunkt der Kontaktscheibe
A	m^2	Spulenquerschnittsfläche
b	m	Bahnradius des Lichtbogens
B	Vs m^{-1}	magnetische Flussdichte
d	m	Dicke der Kontaktscheiben
f	s^{-1}	Frequenz
g	m	minimaler Abstand des Sensors zur Lichtbogenbahn
h	m	Kontakthub, Kontaktabstand
H	A m^{-1}	magnetische Feldstärke
I	A	elektrischer Strom
J	A m^{-2}	elektrische Stromdichte
k	1	Hilfsvariable
K	1	Verstärkungsfaktor
Q, q	A s	Ladung
r	m	Abstand des Sensors zum Lichtbogen
s	m	Abstand zweier sich gegenüberliegender Sensoren
t	s	Zeit
U	V	elektrische Spannung
x	m	Ortskoordinate, Länge
y	m	Ortskoordinate, Länge
z	m	Ortskoordinate, Länge
β	Grad	Winkel zwischen Sensor 1 und dem Lichtbogen
γ	Grad	Bahnwinkel des Lichtbogens
σ	$\text{A V}^{-1} \text{m}^{-1}$	elektrische Leitfähigkeit
ψ	Grad	Winkeldifferenz zwischen Lichtbogen und Sensormodul
φ	Grad	Positionswinkel des Sensors
ω	s^{-1}	Kreisfrequenz

Liste der Indizes

Bolzen	durch die Kontaktbolzen hervorgerufen
ges	gesamt
hall	Hall-Sensor
ind	induziert
Kontakte	durch die Kontakte hervorgerufen
Libo	Lichtbogen
p	projiziert
rLibo	Lichtbogenradius
rot	Rotation
Ref	Referenz
starr	starre Anteile des Strompfades
supply	Versorgung
S	Spule
S1	Spule 1
S2	Spule 2
S3	Spule 3
S4	Spule 4
trv	Transient Recovery Voltage „Wiederkehrende Spannung“

Liste der Konstanten

μ_0 V s A⁻¹ m⁻¹ Permeabilität des Vakuums

Liste der Abkürzungen

AC	Alternating Current, englisch für „Wechselstrom“
AMF	Axialmagnetfeld
CCD	Charge-Coupled Device
CF	CONFLAT
DC	Direct Current, englisch für „Gleichstrom“
eff.	Effektivwert
EMB	Elektromagnetische Beeinflussung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
<i>gauss</i>	Gaussverteilung
LWL	Lichtwellenleiter
MCS	Multi-Cathode-Spot
<i>par</i>	Parabelgleichung
RMF	Radialmagnetfeld

SCS	Single-Cathode-Spot
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SMA	Sub-Miniature-A
trv, TRV	Transient Recovery Voltage „Wiederkehrende Spannung“

Abstract

The breaking capacity as well as the erosion behavior of medium voltage vacuum interrupters are essentially determined by the interaction between the switching arc with the contact system of the vacuum interrupter. Traditionally the foundation research of switching arc behavior and the further development of the vacuum switching technology took place on custom built vacuum vessels. The use of these vessels permits the observation of the switching process with the help of optical methods such as high-speed cameras. These test setups however differ significantly from the commercially available models by their considerably larger vacuum volume and the absence of a metal vapour shield.

This work presents the development and application of a method to record the magnetic flux density at fixed locations during a switching process of a commercially available vacuum interrupter. Further more it describes the set-up of the exteriorly mounted measuring system. In the following step the recorded data is being analyzed to allow the investigation of the position as well as the movement characteristics of the switching arc.

The first part of the project focuses on the measurement system which is part of a previous study. The measurement principles of the measurement system is described in detail. All potentially relevant influences effecting the correct identification of the arc movement are being discussed. The gained insights lead to the development of a new measurement system that is based on the use of Hall sensors. It follows an in depth discussion of the design, function and all relevant disturbance effects. In an additional step a mathematical model is being introduced for the prediction of the expected magnetic field distribution, as well as a method to identify the location of a constricted arc on the contact surface based on the recorded sensor signals.

A FEM simulation model is being applied in order to quantify the influence the components of the vacuum interrupter have on the magnetic field distribution. The influence of these effects on the measurement results is discussed.

The practical part of this work uses both formerly mentioned measurement systems in order to investigate the failure and erosion behavior of commercially available vacuum interrupters which are equipped with spiral contact system. It was possible to identify several different arc motion states and to characterize its occurrences in dependence of the contact spacing and the current level.

Kurzfassung

Das Ausschaltvermögen und das Verschleißverhalten von Vakuumleistungsschaltern der Mittelspannungsebene werden im Wesentlichen von der Interaktion des unvermeidlichen Schaltlichtbogens mit dem Kontaktsystem des Vakuumschalters bestimmt. Die etablierten Methoden Untersuchungen an Schaltlichtbögen zur Grundlagenforschung sowie der Weiterentwicklung der Vakuumschalttechnologie wurden bisher hauptsächlich an speziell angefertigten Vakuumgefäßen durchgeführt. Diese gestatten es, durch Einblickfenster den Schaltvorgang mittels optischer Verfahren wie beispielsweise Hochgeschwindigkeitskameras zu beobachten. Diese Aufbauten unterscheiden sich jedoch durch ihr großes Vakuumvolumen und den fehlenden Metaldampfschirm von handelsüblichen Modellen erheblich.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und dem Einsatz einer Methode sowie der nötigen Messtechnik, die auf der Außenseite einer handelsüblichen Vakuumschaltröhre installiert werden kann und an festen Positionen die magnetische Flussdichte während eines Ausschaltvorgangs misst. Die so ermittelten Signale werden in einem weiteren Schritt so aufbereitet, dass es möglich ist, die Position sowie die Bewegungscharakteristik des Schaltlichtbogens zu untersuchen. Mit dieser Methode wird somit die Lücke zwischen den Experimentalaufbauten und der realen Anwendung geschlossen.

Die Ursprünge des hier vorgestellten Verfahrens basieren auf einem Aufbau, der in dem Vorgängerprojekt der vorliegenden Arbeit entstanden ist. Das Messprinzip, welches diesem Aufbau zugrunde liegt, wird ausführlich beschrieben. Alle relevanten Fehlereinflüsse, welche für eine korrekte Bestimmung der Lichtbogenbewegung relevant sind, werden auf ihren Einfluss auf das Messergebnis hin untersucht. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse wird ein neues Messsystem entwickelt, welches auf Hall-Sensoren basiert. Der Aufbau, die Funktionsweise und alle relevanten Störgrößen werden ausführlich beschrieben. In einem weiteren Schritt wird ein mathematisches Modell zur Bestimmung der zu erwartenden Magnetfeldverteilung hergeleitet und eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, den Aufenthaltsort eines kontrahierten Schaltlichtbogens auf der Kontaktoberfläche aus den gemessenen Sensorsignalen zu bestimmen.

Der Einfluss, den die Komponenten der Vakuumröhre auf die Magnetfeldverteilung und somit auf das Messergebnis ausüben, wird mit einem FEM-Simulationsmodell quantitativ ermittelt. Die daraus entstehenden Auswirkungen auf die Aussagekraft der Messergebnisse werden diskutiert.

Es werden Messungen an Testaufbauten, bei denen die Lichtbogenposition vorge-

geben werden kann, sowie an handelsüblichen Vakuumröhren beschrieben, die es erlauben, die Messergebnisse des Systems mit den Ergebnissen des mathematischen Modells zu vergleichen.

Im praktischen Teil der Arbeit werden beide vorgestellten Messsysteme eingesetzt, um das Ausfallverhalten sowie das Verschleißverhalten von handelsüblichen Vakuumschaltröhren, die mit Spiralkontaktsystemen ausgestattet sind, zu untersuchen. Es werden mehrere verschiedene Bewegungszustände des Schaltlichtbogens identifiziert und deren Auftreten in Abhängigkeit des Kontakthubes und der Stromhöhe untersucht und charakterisiert.

1. Einleitung

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stellt Vakuum im Bereich der Mittelspannungsebene das primär eingesetzte Isoliermedium für Last- und Leistungsschalter dar. Dies ist auf die positiven Eigenschaften zurückzuführen, die Vakuum als Isoliermedium mit sich bringt. Im Bereich kleiner Kontaktabstände bis etwa 5 mm ist Vakuum konkurrierenden Isoliergasen überlegen. Ab Kontaktabständen von etwa 10 mm steigt die Spannungsfestigkeit mit zunehmendem Kontaktabstand kaum noch an. Aus diesem Grunde werden Vakuumschaltgeräte hauptsächlich in der Mittelspannungsebene eingesetzt. Das hohe Isolationsvermögen erlaubt eine kompakte und platzsparende Bauweise. Die resultierenden kleinen bewegten Massen sowie die kurzen Schaltheiten erfordern im Vergleich zu SF₆-Schaltgeräten eine geringere Antriebsenergie. Dies ermöglicht es, kompaktere Schalterantriebe zu bauen, die einen geringeren Energiebedarf aufweisen. Vakuumschaltgeräte zeichnen sich zudem durch einen niedrigen Wartungsaufwand aus und erreichen eine sehr hohe Zahl von Schaltspielen. Der während einer Schalthandlung entstehende Schaltlichtbogen brennt im Vergleich zu SF₆ oder Luft mit einer kleineren Brennspannung, was zu einer kleineren Verlustleistung und reduzierter thermischer Belastung des Kontaktsystems führt. Nach Erlöschen des Schaltlichtbogens erfolgt im Vakuum eine schnelle Wiederverfestigung der Schaltstrecke. Diese Aspekte machen Vakuum als Schaltmedium für Leistungsschalter ausgesprochen attraktiv.

Der Durchbruch der Vakuumschalttechnologie fand in den 1980er Jahren statt, als es gelang, die technisch aufwendigen Arbeitsschritte der Fertigung von Vakuumschaltröhren auf die Serienproduktion zu übertragen. Seitdem nahm deren Marktanteil kontinuierlich zu, und Vakuumschalter verdrängten zunehmend die bis dahin vorherrschenden Luftdruckschalter, ölarmen Schaltgeräte und SF₆-Schalter aus der Mittelspannungsebene. SF₆-Schalter kommen zum gegenwärtigen Zeitpunkt hauptsächlich in der Hochspannungsebene ab 72,5 kV zum Einsatz, wo sie als Leistungsschalter nahezu alternativlos sind.

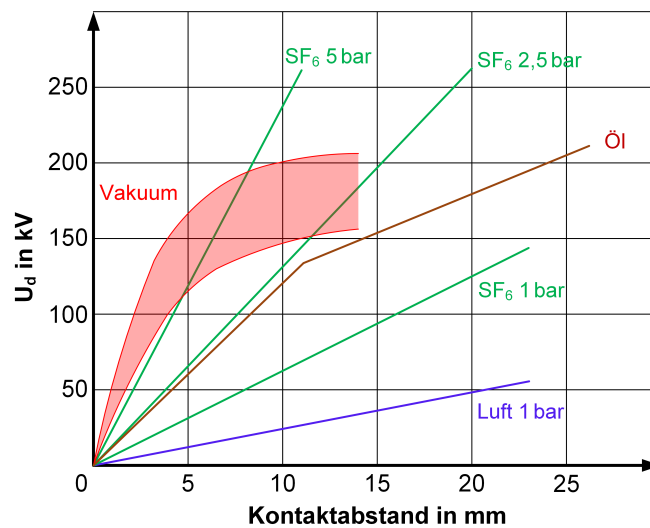


Abbildung 1.1.: Verlauf der Spannungsfestigkeit von gebräuchlichen Schaltmedien in Abhängigkeit des Kontaktabstandes. Nach [Sen 1997]

SF₆ verfügt über ein enormes Treibhauspotential. Die Hersteller SF₆-befüllter Betriebsmittel begegnen dieser Klimaproblematik mit der Reduktion und Überwachung von Leckraten sowie der Rückgewinnung von altem SF₆ aus stillgelegten Anlagen. Im Kontext der verschärften Klimaschutzbestimmungen und der damit verbundenen Klimaschutzbestimmungen der vergangenen 20 Jahre haben sich die Vermarktung und der Betrieb von SF₆-gefüllten Betriebsmitteln erheblich erschwert. Dies drückt sich ebenfalls im Kyoto-Protokoll der Vereinten Nationen aus dem Jahre 1997 aus, welches verbindliche Vorgaben für den Ausstoß von Treibhausgasen für Industrienationen vorschreibt.

In den vergangenen Jahren gab es zahlreiche Bemühungen, die Vakuumtechnologie aufgrund ihrer zahlreichen positiven Eigenschaften für höhere Spannungsebenen zu ertüchtigen. Durch die klimaneutralen Eigenschaften von Vakuum gewannen diese Projekte weiter an Attraktivität, so dass die Forschungsbemühungen in den vergangenen Jahren weiter intensiviert wurden. Mittelfristig werden Hybriden aus SF₆-isolierten Anlagen und Vakuumschaltern entwickelt. Aus diesen Gründen ist damit zu rechnen, dass der Marktanteil von Schaltgeräten mit Vakuum als Isoliermedium weiter wachsen wird.

2. Grundlagen

2.1. Der Vakuumleistungsschalter - Aufbau und Fertigung

Der Aufbau eines Vakuumleistungsschalters lässt sich in 2 Komponenten einteilen: Zum Einen das Schaltgerät und zum Anderen die Vakuumröhre. Das Schaltgerät beinhaltet den Antrieb für die Schalthandlung. Dieser ist je nach Modell als Feder-speicherantrieb mit einem elektrischen Aufzugsmotor oder mit einem magnetischen Aktor ausgeführt. Letzteres stellt jedoch eine kostenintensive Variante dar und ist daher nur vereinzelt anzutreffen. Zusätzlich dient das Schaltgerät als Halterung für die Polteile, welche die Vakuumröhren beinhalten. Je nach Ausführung und Einsatzgebiet können ein bis drei Pole pro Schaltgerät angetrieben werden. Die Vakuumgefäße werden je nach Hersteller als Röhre oder als Kammer bezeichnet. In ihrem Inneren befindet sich das Kontaktsystem, welches in einem Hochvakuum die eigentliche Schalthandlung ausführt. Abbildung 2.1 zeigt den allgemeinen Aufbau einer Vakuumröhre eines Leistungsschalters. Das zylindrische Isoliergehäuse besteht aus einer Aluminiumoxid-Keramik (Al_2O_3) und gewährleistet die äußere elektrische Festigkeit im Zustand geöffneter Schaltkontakte. Um die äußere elektrische Festigkeit weiter zu erhöhen, besteht die Möglichkeit, das Isoliergehäuse zu beschichten, mit einem Schrumpfschlauch zu überziehen oder die gesamte Vakuumröhre in einer SF_6 -Atmosphäre zu betreiben [Fin 1994]. Die Stromzuführung erfolgt durch die Kontaktbolzen, von denen einer beweglich ausgeführt ist, um die Schaltbewegung zu ermöglichen. Die Kontaktbolzen sind aus einem gasarmen und hochreinen OFHC-Kupfer (Oxygen Free High Conductivity) gefertigt. Der obere sowie der untere Gehäusedeckel besteht je nach Modell der Schaltröhre aus Kupfer oder Edelstahl. Der bewegliche Kontaktbolzen ist axial beweglich durch den Gehäusedeckel durchgeführt und mit einem Edelstahlfaltenbalg verlötet, welcher seinerseits wieder mit

dem Gehäusedeckel verlötet ist. Auf diese Weise wird eine axiale Beweglichkeit des Kontaktbolzens bei gleichzeitiger Gasdichtigkeit ermöglicht. Die Lagerung des beweglichen Kontaktbolzens im Gehäusedeckel beinhaltet eine Verdrehsicherung, die Beschädigungen des Faltenbalgs während der Montage der Schaltröhre in das Schaltgerät verhindern soll. An den inneren Enden der Kontaktbolzen befindet sich das Kontaktsystem, welches in Abschnitt 2.3 genauer beschrieben wird.

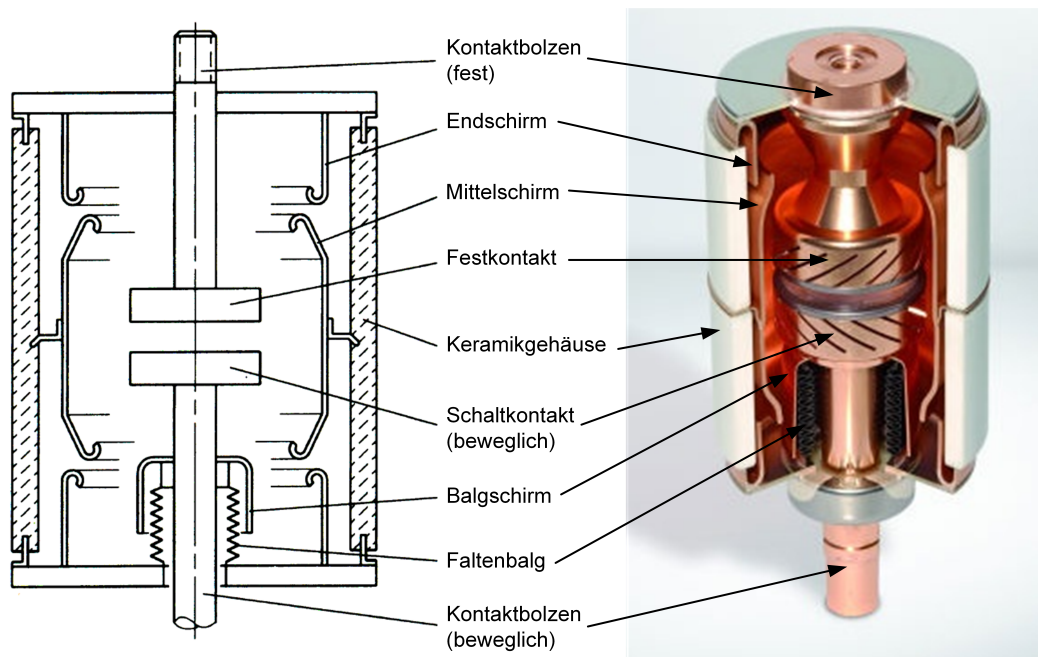


Abbildung 2.1.: Darstellung des Aufbaus einer Vakuumröhre. Links: Schematische Darstellung [Fen 1998] Rechts: Fotografie einer aufgeschnittenen Vakuumröhre [Sie 2008].

Das Kontaktsystem ist umgeben von einem Metaldampfschirm. Während eines Ausschaltvorgangs entsteht im Moment der galvanischen Kontakttrennung unvermeidbar ein Schaltlichtbogen, der in einer Wolke aus Metaldampf als Plasma brennt. Der durch die thermische Einwirkung dieses Plasmas auf die Kontaktoberflächen entstehende Kontaktabbrand existiert zunächst als Metaldampf im Bereich zwischen den Kontaktscheiben des Kontaktsystems. Durch magnetische Kräfte, thermische Strömungen und durch die bei der Verdampfung entstehenden Druckgradienten werden der Metaldampf und feinste Tröpfchen aufgeschmolzenen Kontaktwerkstoffes aus der Schaltstrecke herausgedrückt. Die Aufgabe des Mitteldampfschirmes ist es, dem Metaldampf als Kondensationsfläche zur Verfügung zu stehen und gröbere Partikel geschmolzenen Kontaktwerkstoffes aufzufangen, bevor sie die Innenseite des Kera-

mikgehäuses erreichen können. Auf diese Weise wird eine schleichende Entstehung einer elektrisch leitfähigen Verbindung zwischen den beiden Seiten der Schaltröhre verhindert. Bei den meisten Röhrenmodellen der Mittelspannungsebene ist der Mitteldampfschirm ohne festen Potentialbezug zwischen den Gehäusedeckeln befestigt. In diesem Falle ist der Mittelschirm an dem Isolierkeramikgehäuse mittels einer Nut fixiert, oder das Keramikgehäuse ist in der Mitte geteilt und dort mit dem Mittelschirm verlötet. In der Niederspannungsebene sind vermehrt Modelle zu finden, deren Mittelschirme an dem festen Kontaktbolzen befestigt sind, und somit dessen Potential annehmen [Lip 2003]. Das sich so einstellende Potential des Mittelschirmes hat einen erheblichen Einfluss auf das Schaltverhalten der Vakuumröhre [Bie 1993]. Zusätzlich sind an den Gehäusedeckeln sogenannte Endschirme angebracht. Ihre Aufgabe ist es, das elektrische Feld im Inneren der Röhre vorteilhaft zu beeinflussen. Ebenfalls sollen sie durch eine Labyrinthbildung den Weg des Metaldampfes zur Innenseite des Keramikgehäuses verlängern. Ein weiterer Schirm schützt den Metallfaltenbalg.

Der Fertigungsprozess einer Vakuumröhre kombiniert eine Reihe von technologisch sehr anspruchsvollen Prozessen und bedeutet daher einen hohen finanziellen Aufwand. Aufgrund der Sensitivität einer Vakuumisolation gegenüber Verunreinigungen mit Mikropartikeln ist es erforderlich, die Montage unter Reinraumbedingungen durchzuführen. Zusätzlich können weitere Verunreinigungen der Oberflächen zu Ausgasungen führen und somit verhindern, dass ein ausreichend reines Vakuum in der fertigen Röhre erzielt werden kann. Der endgültige Montageprozess, der aus Verlöten der Komponenten und Evakuieren des Innenraumes besteht, wird in einem einzigen Arbeitsschritt durchgeführt. Dies geschieht in einem speziellen Lötoven, der die Möglichkeit bietet, den Innendruck bis auf 10^{-8} mbar zu senken und gleichzeitig bis auf über 800°C zu erhitzen [Sla 2008]. Dabei werden der Innendruck und die Temperatur des Ofens gezielt dem Ausgasverhalten der Materialien der einzelnen Komponenten angepasst. Um den Einsatz der verschiedenen Materialien im Ultrahochvakuum auf Dauer zu ermöglichen, werden einige Komponenten unter anderem auch galvanisch behandelt. Die Fertigungstechnologie, welche auf dem Hartverlöten von Metallen und Keramiken zu einer nahezu perfekt gasdichten Verbindung beruht, hat sich aus der Fertigung von Elektronenröhren entwickelt, was zur Namensgebung der Vakuumröhre beigetragen hat. Die fertig verlöteten Röhren weisen nach erfolgreicher Fertigung einen Innendruck von weniger als 10^{-6} mbar auf. Dennoch erreichen sie nicht ohne weiteres Zutun ihre volle Spannungsfestigkeit. Grund

hierfür sind unvermeidbare mikroskopische Unebenheiten auf den Kontaktoberflächen, die durch den Fertigungsprozess entstanden sind. Zusätzlich lagern sich auf den Oberflächen durch Adsorptionsprozesse Gasmoleküle an. Es gelangen ebenfalls Gasmoleküle entlang der Korngrenzen in das Material der Bauteile und können sich dort anlagern [WAW 2000]. Dies hat zur Folge, dass im evakuierten Zustand diese Gasmoleküle wieder austreten können und so die Vakuumqualität negativ beeinflussen. Die Folge dieser Prozesse ist eine nicht kalkulierbare Beeinflussung der elektrischen Spannungsfestigkeit des Kontaktsystems. Aus diesem Grunde ist ein Konditionierungsprozess unabdingbar und stellt daher einen festen Bestandteil des Fertigungsprozesses einer Vakuumröhre dar [Bal 1993]. Es gibt zahlreiche Techniken der Konditionierung, die von Hersteller zu Hersteller variieren. Die meisten Konditionierungsmethoden sehen eine gezielte elektrische Beanspruchung der geöffneten Kontakte bis an die Spannungsfestigkeit oder darüber hinaus vor. Das hohe elektrische Feld zwischen den Kontakten oder der sich ergebende Lichtbogen reinigt die Oberflächen und beseitigt dominante Mikrorauheiten [ET 1990; Lat 1981].

2.2. Der Schaltlichtbogen

Während des Ausschaltens von elektrischen Strömen im Vakuum kommt es im Moment der Kontakttrennung unvermeidlich zu einer Lichtbogenerscheinung, die in der Literatur häufig als Vakuumbogen bezeichnet wird. Der Schaltlichtbogen selbst ist eine Plasmaerscheinung, die aus ionisiertem Metaldampf besteht, welcher durch die Verdampfung von Kontaktmaterial entstanden ist. Da die Anwesenheit des Metaldampfes das in der Röhre vorherrschende Vakuum in diesem Moment verdrängt, stellt die Bezeichnung Vakuumbogen einen Widerspruch dar, auf den an dieser Stelle hingewiesen sei [Laf 1980].

Die Oberflächen der Kontakte eines Vakuumschalters weisen trotz aufwendiger Herstellungsverfahren mikroskopische Unebenheiten auf, die auf die Fertigung und die Struktur des verwendeten Werkstoffes zurückzuführen sind. Im geschlossenen Zustand kommt es daher nur auf einer Teilfläche der gesamt möglichen Kontaktoberfläche zu einer Berührung und somit zu einer elektrisch leitfähigen Verbindung. Durch das Schaltgerät werden die Kontakte mit einer definierten Kraft zusammengepresst. Auf diese Weise werden die Spitzen der Mikrorauheiten im elastischen bis teilweise in den plastischen Bereich verformt. Dadurch vergrößert sich die elektrisch leitenden

de Fläche, und somit sinkt der Kontaktübergangswiderstand. Im Falle eines Ausschaltprozesses sinkt zunächst die Anpresskraft. Die elastisch verformten Strukturen kehren in ihre Ausgangsform zurück, die plastisch verformten verbleiben deformiert. Während dieser Phase verkleinert sich die leitende Kontaktfläche. Der von außen eingeprägte auszuschaltende Strom folgt der Netzfrequenz und kann in dieser Zeit als konstant angesehen werden. Folglich erhöht sich die Stromdichte in den verbleibenden elektrisch leitenden Kontaktpunkten [Bur 1985]. Das Kontaktmaterial wird an diesen Punkten stark erhitzt. Ab der Schmelztemperatur verflüssigen sich die letzten verbliebenen Kontaktstellen, um bei Erreichen der Verdampfungstemperatur explosionsartig zu verdampfen. Der entstandene Metaldampf sowie entstandene Metallionen werden in den Kontaktspace geschleudert. An der Stelle der Verdampfung bleibt auf der Kathode eine heiße Zone zurück. Von ihr werden neue Elektronen und Metaldampf in den Kontaktspace emittiert. Diese Zone wird als Kathodenfleck bezeichnet. Es gibt zahlreiche Veröffentlichungen über die Vorgänge in Kathodenflecken und deren Verhalten. Eine frühe Betrachtung nach [Eck 1974; Laf 1980] beschreibt den Vorgang der Ionisation des Metaldampfes und der Energiezufuhr der Kathodenflecken folgendermaßen: Durch die höhere Beweglichkeit der Elektronen wandern diese schneller zur Anode hin ab. Der Bereich vor der Kathode wird in der Folge durch einen Überschuss an positiven Metallionen erfüllt, was zur Bildung einer positiven Raumladungszone führt. Das resultierende elektrische Feld in diesem Bereich wird dadurch verstärkt und ist auf die Kathode hin gerichtet. Die Folge ist eine verstärkte Beschleunigung der Elektronen, die von der Kathode emittiert werden. Die Elektronen können somit eine höhere Energie aufnehmen, während sie sich durch die Raumladungszone bewegen. Die Raumladungszone geht in Richtung der Anode in die zuvor entstandene Metaldampfwolke über. Wenn die Elektronen die Metaldampfwolke erreichen, treffen sie auf Metallatome, die sie bei einem Zusammenstoß mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ionisieren. Bei diesem Prozess entstehen Wärme sowie positive und negative Ionen. Die positiven Ionen fallen zurück auf die Kathode und erwärmen durch ihren energiereichen Aufprall die Kathodenoberfläche und führen somit dem Kathodenfleck einen Teil der Energie zu, die er durch den Emissionsprozess verloren hat. Das Resultat dieses Prozesses ist ein Gemisch aus Elektronen, ionisierten Metallionen und neutralen Metallatomen, welches sich im Kontaktspace ausbreitet und als interelektrodisches Plasma bezeichnet wird. In den 1980er Jahren wurde diese Betrachtung von [Lit 1988] et al. durch ein weiteres Modell ergänzt und modifiziert. Dieses erklärt die Energiezufuhr der Kathodenflecke

ausschließlich durch die vorherrschende hohe Stromdichte und die daraus resultierende Joulsche Wärme. Die Bewegung der Kathodenflecken wird durch eine kurze Lebensdauer und ständige Neuzündung an benachbarten Orten erklärt. Die Energiezufuhr durch zurückfallende Ionen für den Emissionsprozess wurde als unbedeutend eingestuft [Vin 2002]. [And 1992] et al. bestätigen in praktischen Untersuchungen die kurze Lebensdauer der Kathodenflecken, die mit den Neuzündungen begründet wird.

Die Charakteristika des Kathodenflecks zeigen eine starke Abhängigkeit vom Kontaktmaterial. Bei Kupferelektroden existiert bis zu einer Stromhöhe von etwa 100 A nur ein Kathodenfleck als Emissionszentrum. Dieser hat einen Durchmesser von etwa 30 μm bei einer Temperatur von bis zu 4000 K [SR 1979]. In ihm heizt sich Kontaktwerkstoff bis zur Verdampfungstemperatur auf, um als sogenannte „superkritische Flüssigkeit“ explosionsartig zu verdampfen. Damit endet seine kurze Lebensdauer von nur einigen Nanosekunden [Geb 1985]. Er hinterlässt einen Krater in der Kathodenoberfläche mit schroffen Randstrukturen, die vom Emissionsprozess stark aufgeheizt wurden. Eine dieser Spitzen wird das Emissionszentrum des nächsten Kathodenfleckes, auf den der Strom kommutieren wird. Die nötige Energie, die dem neuen Emitter zur Verfügung gestellt werden muss, gelangt ausschließlich durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung des vorangegangenen Emissionszentrums zum neuen Emitter [Pro 1986; Daa 1978]. Auf diese Weise bewegt sich der Kathodenfleck in zufälliger Richtung auf der Kathodenoberfläche. Bei diesem Prozess spielen die Siedetemperatur, die Verdampfungstemperatur sowie die Wärmeleitfähigkeit des Kontaktwerkstoffes eine maßgebliche Rolle. Ebenfalls ist das Wiedererstarrungsverhalten ein wichtiger Faktor. [Jüt 1979] bezeichnet die Bewegung des Kathodenflecks aufgrund des permanenten Abbrandes seines lebensnotwendigen Emitters als Existenzbedingung für den Kathodenfleck.

Der Kathodenfleck schleudert bei seinem Verdampfungsprozess Metallatome und Metallionen kegelförmig in Richtung der Anode in den Kontaktpalt. Diese Struktur wird als Kathoden-Plasma-Jet bezeichnet [And 1990; Wie 1985]. Mit steigendem Strom bilden sich weitere Kathodenflecke aus. Dies ist der Übergang vom **Single-Cathode-Spot-Mode** (SCS-Mode) zum **Multi-Cathode-Spot-Mode** (MCS-Mode). Die Kathodenflecke stoßen sich gegenseitig ab und verteilen sich auf der Kathodenoberfläche. Wenn die Plasmajets der einzelnen Kathodenflecken sich gegenseitig zu überlappen beginnen, ist der gesamte Kontaktpalt mit Metaldampfplasma gefüllt. Dieser Zustand wird als „diffuser Lichtbogen“ bezeichnet.

Die Spannung, die in diesem Modus über dem Lichtbogen abfällt, setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Die Spannung über den Kathodenflecken wird auch Kathodenfall genannt. Sie ist in diesem Lichtbogenmodus nahezu konstant und weist eine starke Abhängigkeit vom Kontaktmaterial auf. Für Kupfer beträgt sie beispielsweise 21 V [Mit 1970a; Ree 1963]. Die Spannung über dem interelektrodischen Plasma ist aufgrund der geringen Teilchendichte wesentlich kleiner. Sie weist ein ohmsches Verhalten auf sowie Abhängigkeiten vom Kontaktmaterial und der Kontaktgeometrie [Rus 1994]. Die daraus resultierende Lichtbogenspannung zeigt einen zeitlich glatten Verlauf.

Das Material, welches während des explosionsartigen Verdampfungsprozesses der Kathode als Plasma in den Kontaktspace geschleudert wird, kann Geschwindigkeiten von bis zu 10^4 m/s erreichen [BMS 1985]. Einige der darin enthaltenen positiven Ionen besitzen eine ausreichend hohe Energie, um gegen das elektrische Feld bis zur Anode zu gelangen. Dies gilt hauptsächlich für Ionen, die bis zu fünffach ionisiert sind [DM 1969; BG 1991; TK 1992]. Auf diese Weise fließen positive Ladungen entgegen der eigentlichen Stromrichtung. Um den von Außen eingeprägten Strom in Summe zu erreichen, erhöht sich der Elektronenstrom in positive Richtung. Laut [Kim 1971; Kim 1973] beträgt der Ionenstrom 8 bis 12 % des Elektronenstroms.

Der zusätzliche Ionenstrom erhöht die Teilchendichte vor der Anode. Dadurch sinkt die mittlere freie Weglänge, die Wahrscheinlichkeit von Zusammenstößen erhöht sich, und weniger positive Ionen erreichen die Anode. Vor dieser baut sich daraufhin eine negative Raumladungszone aus, die das elektrische Feld schwächt. Somit können positive Ionen leichter zur Anode gelangen, woraufhin sich die Anzahl der auf der Anode einschlagenden Ionen wieder erhöht und die Teilchendichte vor der Anode wieder steigt. Damit beginnt der Vorgang erneut. Dieser Kreisprozess findet in einem Strombereich von etwa 10 kA bis zu 50 kA statt und wird als Ionenverarmungseffekt bezeichnet [Mit 1970b].

Bis zu diesem Zeitpunkt verhält sich die Anode passiv und dient ausschließlich als Trefferfläche für die Plasma-Jets der Kathodenflecke. Aufgrund der kegelförmigen Gestalt der Kathoden-Jets wird ein großer Teil der Anodenoberfläche zum Stromfluss ausgenutzt, so dass hier geringe Stromdichten herrschen. Mit weiter steigenden Strömen im Bereich zwischen 4 kA und 10 kA ändert sich die passive Rolle der Anode, es kommt zur Bildung eines Anodenflecks. In der Literatur existieren viele Arbeiten, die sich mit der Bildung des Anodenflecks und den damit verbundenen Randbedingungen beschäftigen. An dieser Stelle sei auf folgende Arbeiten verwie-

sen: [IGB 1983; WE 1989; SS 1984]. Grundsätzlich greifen die meisten Arbeiten auf zwei unterschiedliche Erklärungsansätze zurück. Eine Erklärung sieht eine Gleichgewichtsstörung des Kreisprozesses der Ionenverarmung vor. Ab einer ausreichend hohen Stromstärke ist die Teilchendichte vor der Anode so hoch, dass die Beweglichkeit der Elektronen zu stark eingeschränkt wird, um die entstandene gesamte Raumladungszone zu neutralisieren. An den Stellen, an denen die Neutralisation weniger ausgeprägt stattfand, erhöht sich das elektrische Feld stärker als in den umliegenden Bereichen, wodurch Elektronen stärker beschleunigt werden. Die Folge ist eine Konzentration der Stromdichte auf der Anode an diesen Stellen. An der heißesten Stelle beginnt die Anode Neutraldampf zu emittieren, der durch den konzentrierten Elektronenstrom direkt vor der Anode ionisiert wird. Die Folge ist ein konzentriertes Plasma, welches das Anodenmaterial weiter erhitzt und als Anodenfleck bezeichnet wird [Mit 1970a].

Der andere Erklärungsansatz wird als „Pinch-Effekt“ bezeichnet. Er beschreibt ein Gleichgewicht zwischen dem thermodynamischen Druck im Inneren des Plasmas, der das Plasma zu einer Expansion antreibt, und dem magnetischen Druck, der durch das Eigenmagnetfeld hervorgerufen wird und von Außen das Plasma zusammenschnürt. Ab einer ausreichend hohen Stromhöhe neigt sich dieses Gleichgewicht zugunsten des magnetischen Drucks. Dies beginnt auf der Anodenseite. Die Kathoden-Jets beginnen sich auf der Anodenfläche zu fokussieren. Die Folge ist eine starke lokale Erwärmung der Anode bis hin zum Schmelzpunkt des Elektrodenwerkstoffes. Auf der Anode bildet sich ein Anodenfleck.

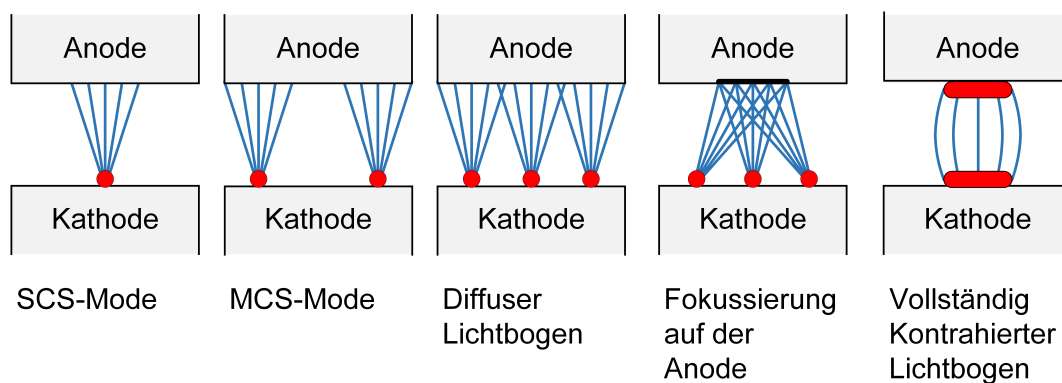


Abbildung 2.2.: Darstellung der Erscheinungsformen des Schaltlichtbogens. Nach [Lin 2001].

Die Anode übernimmt nun eine aktive Rolle als Emitter für Ladungsträger und Metaldampf. Folglich steigt die Plasmadichte im Kontaktpalt stark an. Die Spannung über dem Lichtbogen teilt sich für diffuse Lichtbögen in zwei Teile auf. Der Kathodenfall ist, wie bereits erwähnt, nahezu konstant. Der Spannungsfall über der Plasmasäule verhält sich für diffuse Lichtbögen wie der eines ohmschen Widerstandes und zeigt eine Proportionalität zur Stromhöhe. Mit Bildung des Anodenflecks kommt der Anodenfall als dritter Teil hinzu. Die Bildung des Anodenflecks ist mit einem charakteristischen Verlauf der Lichtbogenspannung verbunden [Fis 1985]. Abhängig vom Elektrodenmaterial können hochfrequente Spannungsspitzen von einigen 100 V entstehen. Einer der Gründe hierfür liegt in den Instabilitäten des Ionenverarmungseffektes und dem damit verbundenen Auf- und Abbau von Raumladungszonen [Beh 1984]. Nachdem sich der Anodenfleck vollständig ausgebildet hat, reduziert sich der Anteil der Spannungsspitzen, und der Spannungsverlauf glättet sich, bleibt aber über dem Niveau des diffusen Bogens [SGR 1986].

In Abbildung 2.2 sind die grundsätzlichen Erscheinungsformen dargestellt, die ein Schaltlichtbogen durchläuft.

Aufgrund der Konzentration des gesamten Stromflusses auf den Querschnitt des Anodenflecks ist die Erscheinung des Anodenflecks mit starken thermischen Belastungen für die Anode verbunden. Die Folge ist ein massiver Abbrand von Elektrodenmaterial [Box 1977]. Die eingebrachte Wärme heizt die Anode bis tief unter die Oberfläche auf.

Steigt der Strom auf Werte über 10 kA, setzt sich der Kontraktionsprozess des Lichtbogens fort und schnürt das Plasma bis zur Kathode zusammen. Die Kathodenfleckchen ziehen sich in Folge ebenfalls zusammen. Es bildet sich eine hell leuchtende, klar umrissene Plasmasäule aus, die als vollständig kontrahierter Lichtbogen bezeichnet wird [Kau 1997]. Abbildung 2.2 gibt einen Überblick über die beschriebenen Erscheinungsformen des Lichtbogens. Zusätzlich existieren noch zahlreiche Zwischenmodi und Übergangsformen des Lichtbogens, die in den vergangenen 40 Jahren Gegenstand vieler Untersuchungen waren.

Gegen Ende der Stromhalbschwingung sinkt der Strom wieder, und der Lichtbogen kehrt in den diffusen Zustand zurück [Hey 1990]. Die einzelnen Kathodenfleckchen erlöschen nach und nach. Der letzte Kathodenfleck wird mit sinkendem Strom aufgrund mangelnder Energiezufuhr instabil und erlischt schließlich. Die Stromschwelle, bei der dies geschieht, wird als Abrissstrom bezeichnet und weist eine ausgeprägte Materialabhängigkeit auf sowie eine Abhängigkeit von der elektrischen Last des

Schalters [Cza 1986; Hal 2012]. Der auszuschaltende Strom folgt in diesem letzten Abschnitt also nicht mehr der Sinushalbschwingung, sondern wird durch das Erlöschen des letzten Kathodenflecks abgeschnitten, zum Teil mit einem vorausgehenden hochfrequenten aufschwingenden Verlauf, und verursacht eine hohe Stromsteilheit, die in den angeschlossenen Betriebsmitteln zu Überspannungen führen kann.

Unmittelbar nach Stromnull ist die Anode durch die hohe Wärmeeinbringung des Anodenflecks an der Oberfläche noch teilweise verflüssigt. Diese Stellen können als Emitter für Metaldampf oder Mikropartikel dienen, was die Wiederverfestigung der Schaltstrecke nachteilig beeinflussen kann [Far 1978].

2.3. Beeinflussung des Schaltlichtbogens durch die Gestaltung des Kontaktsystems

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, durchläuft der Schaltlichtbogen bei Erreichen ausreichend hoher Stromhöhen einen Kontraktionsprozess. Die Folge für das Kontaktsystem ist eine Konzentration der thermischen Energie auf eine kleinere Fläche, als es bei einem diffus brennenden Bogen der Fall wäre. Es folgt ein vermehrtes Aufschmelzen und Verdampfung von Kontaktmaterial und somit eine erhöhte Erosion des Kontaktsystems. Die Erosionserscheinung für das Kontaktsystem stellt sich in Form einer Verformung der Kontaktoberfläche dar, die die effektive Kontaktfläche im geschlossenen Zustand reduzieren kann und somit den Kontaktübergangswiderstand erhöht. Eine weitere Verformung bis hin zur Umformung der Kontaktgeometrie kann die Wirkungsweise des Kontaktsystems beeinflussen und auf diese Weise die Schaltleistung für weitere Schaltvorgänge senken. Die vermehrte Verdampfung von Kontaktmaterial erschwert den Prozess der Wiederverfestigung der Schaltstrecke und erhöht die Menge der Materialpartikel aus Kontaktwerkstoff, die ihrerseits Rück- oder Wiederspaltung verursachen können. Aus diesen Gründen wird bei der Gestaltung des Kontaktsystems beabsichtigt, einen punktuellen Eintrag thermischer Energie durch den Schaltlichtbogen zu vermeiden. Dies wird durch magnetische Beeinflussung erreicht. Es haben sich zwei Strategien etabliert, die mit je einem bestimmten Kontaktsystem verfolgt werden, welche im folgenden näher beschrieben werden. Aus Gründen der Vollständigkeit und seiner Bedeutung für kleinere Schalter der Vakuumtechnik soll hier ebenfalls der Plattenkontakt Erwähnung finden.

2.3.1. Kontaktmaterial

Während einer Schalthandlung muss das Kontaktsystem hohen thermischen Belastungen durch den Schaltlichtbogen sowie den starken mechanischen Einwirkungen beim Einschalten viele tausendmal standhalten. Darüber hinaus haben die Kontakte einen großen Einfluss auf das Zustandekommen, die Erscheinungsform und die Bewegungscharakteristik des Schaltlichtbogens. Daraus ergeben sich teilweise widersprüchliche Anforderungen an das Kontaktmaterial. Einen Werkstoff zu finden, der den besten Kompromiss darstellt, war Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten in den vergangenen 40 Jahren. An dieser Stelle sei auf folgende Literatur hingewiesen: [Rei 1983; Cza 1986; Sla 1994; Tem 2003]. Als beste Lösung hat sich ein Kupfer-Chrom-Verbundstoff herausgestellt, der pulvermetallurgisch in einem Sinterprozess hergestellt wird [Rei 1983]. Ein solcher Verbundwerkstoff kombiniert die für einen Schaltprozess im Vakuum positiven Eigenschaften von Kupfer und Chrom. Mischungsverhältnisse von 40 bis 75 % (Gew.-%) Kupfer sind üblich [Pla 2008]. Das gebräuchlichste Mischungsverhältnis ist 75 % Kupfer, oft auch als CuCr 75 bezeichnet [Gen 2002]. Es existiert jedoch keine einheitliche Schreibweise für das Mischungsverhältnis. Während eines Ausschaltprozesses führt die Lichtbogeneinwirkung zum Aufschmelzen von Kontaktmaterial. Die sich durch das wieder erstarrte Kontaktmaterial einstellende, neue Oberflächenstruktur hat großen Einfluss auf die Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke nach dem Schaltprozess. Die hohe Schmelztemperatur von Chrom führt zu einem schnellen Wiedererstarren des aufgeschmolzenen Kontaktmaterials und verhindert so eine starke Deformation der Kontaktoberfläche. Die wieder erstarrten Oberflächen von CuCr-Kontakten weisen glatte Formen und Strukturen auf, was für die Erhaltung der elektrischen Festigkeit der Schaltstrecke von Vorteil ist. Zusätzlich verfügt Chrom über sogenannte „Getter-Eigenschaften“ und kann bestimmte Gasmoleküle an sich binden. Dies kann sich positiv auf die Vakuumqualität auswirken. Die geringe Löslichkeit von Chrom in Kupfer bei Raumtemperatur führt zu einer Gefügestruktur des fertigen Kontaktwerkstoffes, in dem große Chromkörner vom feineren Kupfer umschlossen werden. Diese Struktur erlaubt es dem Kupfer, seinen geringen elektrischen Widerstand und die gute thermische Leitfähigkeit teilweise auf den Verbundwerkstoff zu übertragen. So lassen sich Kontaktsysteme herstellen, die Kontaktübergangswiderstände im geschlossenen Zustand von etwa 10 bis 20 $\mu\Omega$ während der gesamten Lebensdauer aufweisen [Lip 2003] und eine geringe Neigung zum Verschweißen im Kurzschlussfall zeigen.

2.3.2. Plattenkontakte

Der Plattenkontakt stellt die einfachste Bauweise eines Kontaktsystems dar. Die simple Geometrie übt nahezu keinen Einfluss auf den Schaltlichtbogen aus, so dass dieser ungehindert und unbeeinflusst zwischen den Kontakten brennen kann. In der Anfangszeit der Vakuumschalttechnik wurde versucht, den Kontraktionsprozess des Schaltlichtbogens mit großen Durchmessern der Plattenkontakte herauszuzögern. Aufgrund der geringen möglichen Schalteistung wurde der Plattenkontakt bei Leistungsschaltern durch aufwendiger gestaltete Kontaktgeometrien ersetzt. Heute sind Plattenkontakte hauptsächlich in Lastschaltern und Schützen zu finden, bei denen Ausschaltprozesse von einigen hundert Ampere bis wenigen Kiloampere auftreten. Bei diesen Stromhöhen findet noch keine Kontraktion des Schaltlichtbogens statt, so dass der Abbrand der Kontaktoberflächen - und somit die erreichbare Lebensdauer - einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz ermöglicht.

2.3.3. Radialmagnetfeldkontakte

RadialMagnetFeldkontakte (RMF-Kontakte) werden je nach Hersteller auch als **TransversalMagnetFeldkontakte** (TMF-Kontakte) bezeichnet. Sie werden bis Stromhöhen von 40 kA und Spannungen von bis zu 36 kV eingesetzt [Ren 2000]. Diese Kontaktsysteme lassen zwar eine Kontraktion des Lichtbogens zu, animieren ihn jedoch zu einer möglichst kontinuierlichen Bewegung auf der Kontaktoberfläche. Auf diese Weise verteilt sich der Abbrand, so dass die Kontaktoberfläche gleichmäßig beansprucht wird [Uph 1988]. Erreicht wird dies durch die Formgebung der Kontakte, die den auszuschaltenden Strom auf einem Umweg zum Schaltlichtbogen führt. Die Form dieses Umweges ist derart gewählt, dass das durch den Strom hervorgerufene Magnetfeld im Bereich zwischen den Kontakten in radiale Richtung weist. Daher stammt der Name Radialmagnetfeldkontakt. Die Ladungsträger, die sich durch den Lichtbogen hauptsächlich in axialer Richtung bewegen, kreuzen das radial gerichtete Magnetfeld. Gleichung 2.1 folgend wirkt eine Lorentzkraft, die auf die Ladungsträger vorwiegend in azimuthaler Richtung wirkt. Der Lichtbogen wird dadurch in eine Kreisbewegung auf der Kontaktoberfläche gedrängt.

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

2.3. Beeinflussung des Schaltlichtbogens durch die Gestaltung des Kontaktsystems

Diesem Prinzip folgend wurden unterschiedliche Geometrien entwickelt, die mit Hilfe des auszuschaltenden Stromes ein radial gerichtetes Magnetfeld im Kontaktspalt hervorrufen. In den 1950er Jahren hat die Firma Schneider Electric einen spiralförmigen Kontakt entwickelt, der einen besonders einfachen Vertreter der RMF-Kontakte darstellt. Abbildung 2.3 zeigt links die Darstellung eines Spiralkontaktsystems.

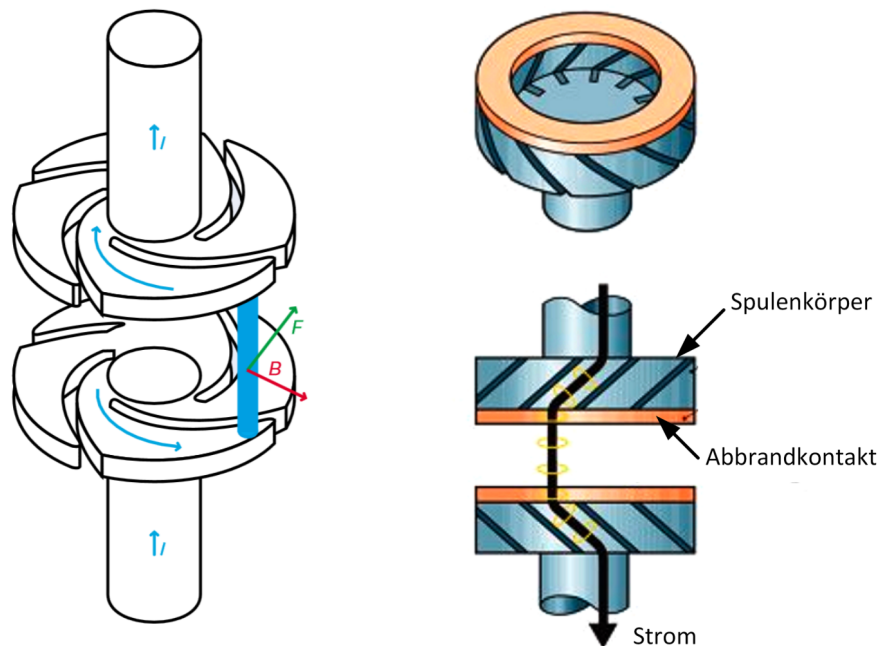


Abbildung 2.3.: Links: Darstellung eines Spiralkontaktsystems [FHS 2000]. Rechts: Darstellung eines RMF-Kontaktsystems mit Topfkontakten [Sie 2008].

Die Kontakte bestehen jeweils aus einer Scheibe eines CuCr-Verbundstoffes. In die Kontaktscheibe sind Schlitzte eingefräst, die die Spiralarms ausbilden [Sla 1984]. Der den Lichtbogen speisende Strom muss durch die Spiralarms fließen. Die Form der Spiralarms bewirkt die radiale Ausrichtung des Magnetfeldes im Kontaktspalt. Im Zentrum der Kontaktscheiben wirkt dieses Prinzip nicht, daher weisen Spiralkontakte hier eine Vertiefung auf, um den Lichtbogen von dieser Position fern zu halten. Es werden Kontaktsysteme mit geschwungenen und eckigen Spiralarms gefertigt, deren Anzahl variieren kann. Am gebräuchlichsten sind vier Spiralarms pro Kontaktscheibe. Zusätzlich sind zumeist größer dimensionierte Spiralkontakte auf ihrer Kontaktoberfläche nach außen hin abgeflacht, so dass im Bereich größerer Radien die Kontakte im geschlossenen Zustand nicht aufeinander liegen. Diese Maßnahme soll den entstehenden Metalldampf nach außen ableiten und den Lichtbogen auf Umläufe mit größeren Radien drängen. Während eines Umlaufes auf der Kon-

kontaktoberfläche ist der Lichtbogen gezwungen, am Ende eines Spiralarms über den Spalt auf den nächsten Spiralarm zu springen. Dieser Vorgang ist mit einer Kommutierung des Strompfades verbunden und kann die Bewegung des Lichtbogens abbremsen [Beh1984]. An dieser Stelle ist daher mit einem erhöhten Abbrand zu rechnen. Da hier der Abbrandkontakt gleichzeitig die für die Kontaktgeometrie relevante Struktur darstellt, weisen Spiralarmkontakte eine kürzere Lebensdauer auf als andere RMF-Kontaktsysteme. Sobald Erosionsprozesse eine leitende Verbindung aus Kontaktmaterial zwischen einer Spiralarmspitze und dem benachbarten Spiralarm hergestellt haben, kann der Strom einen alternativen Weg zum Lichtbogen finden. Dieser Moment führt zu einer schlagartigen Senkung der Leistungsfähigkeit des Kontaktsystems [Ret2012; KK2011]. Eine Trennung von Komponenten der relevanten Kontaktgeometrie und dem Abbrandkontakt führt zu der zweiten gebräuchlichen Form des RMF-Kontaktes, dem so genannten Topfkontakt. Abbildung 2.3 zeigt rechts die Darstellung eines Topfkontaktsystems. Er besteht aus einem kupfernen Spulenkörper, dem ein Abbrandkontakt aufgelötet ist [Sla1984]. Da der Abbrand den Spulenkörper nahezu nicht beeinträchtigt, können Topfkontakte eine größere Anzahl an Ausschaltungen erreichen als vergleichbar dimensionierte Spiralarmsysteme. Ihre Fertigung erfordert jedoch einen erhöhten Aufwand.

2.3.4. Axialmagnetfeldkontakte

Die Gruppe der **AxialMagnetFeldkontakte** (AMF-Kontakte) verfolgt das Ziel, den Kontraktionsprozess des Lichtbogens hin zu größeren Strömen zu verschieben, und so den Lichtbogen länger im diffusen Mode brennen zu lassen [HG1980; Lin1987]. Auf diese Weise wird die thermische Belastung, und somit der Kontaktabbrand, auf einen großen Teil der Kontaktoberfläche verteilt. Eine Spulenanordnung in beiden Kontaktstücken erzeugt ein axial gerichtetes Magnetfeld im Kontaktspalt. Die Kontaktoberflächen sind mit einem Abbrandkontakt aus einem CuCr-Verbundwerkstoff versehen. Ein Ladungsträger, welcher sich entsprechend der Stromflussrichtung durch das magnetische Feld bewegt, wird auf eine helixförmige Bahn gedrängt. Dies ist in Abbildung 2.4 links dargestellt. Die von den Emissionszentren ausgehenden einzelnen Teillichtbögen werden zu Säulen auseinander gezogen. Aufgrund der größeren Masse der positiven Ionen beschreiben diese einen größeren Bahnradius als die negativen Elektronen. Daher weisen die einzelnen Säulen auf ihrer Außenseite eine positive

2.3. Beeinflussung des Schaltlichtbogens durch die Gestaltung des Kontaktsystems

Ladung auf und stoßen sich so gegenseitig ab. Folglich verteilen sich die einzelnen Säulen auf der Kontaktoberfläche, woraufhin sich ebenfalls die thermische Einwirkung und der resultierende Kontaktabbrand gleichmäßiger verteilen [Lin 1987].

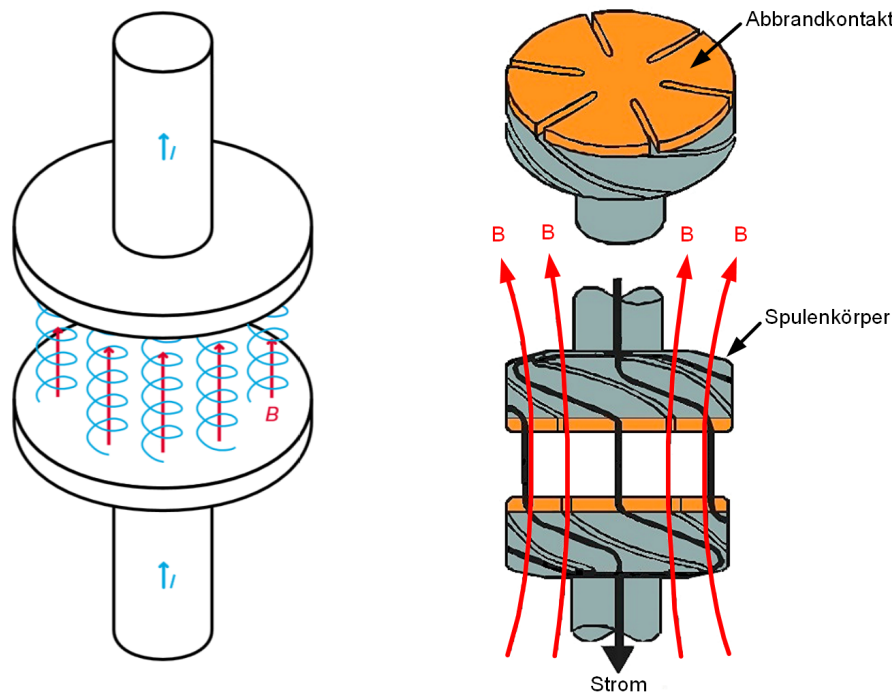


Abbildung 2.4.: Links: Schematische Darstellung der prinzipiellen Wirkungsweise eines AMF-Kontaktsystems [FHS 2000] Rechts: Darstellung eines unipolaren AMF-Kontaktsystems [Sie 2008].

Die axial gerichteten Magnetfelder durchdringen die Abbrandkontaktscheiben und induzieren dort Wirbelströme, die nach der Lichtbogenlöschung etwas Zeit zum Abklingen in Anspruch nehmen [SL 2003]. Dieser Vorgang behindert die Wiederverfestigung der Schaltstrecke nach Stromnull und somit die Ausschaltfähigkeit des Kontaktsystems. Um die Wirbelstrominduktion während der Lichtbogendauer zu reduzieren, werden die Abbrandkontakte mit radialen Schlitzen versehen [Fen 1998]. AMF-Kontaktsysteme lassen sich anhand des Polaritätswechsels des Feldes zwischen den Kontaktspalten in unipolare und multipolare Systeme einteilen [Kur 1980]. Abbildung 2.4 zeigt rechts die Darstellung eines Vertreters der unipolaren Kontaktsysteme, die die größte Verbreitung finden.

In kleineren Vakuumschaltröhren werden meist aus Kostengründen günstige RMF-Spiralkontakte verbaut. Für Modelle bei denen eine längere Standzeit gefordert ist werden RMF-Topfkontakte gewählt. Erst im Bereich von 30 kA und darüber hinaus

kommen hauptsächlich Axialmagnetfeldkontakte zum Einsatz. Der Grund hierfür liegt in Ihrem überlegenen Ausschaltverhalten, was Abbrandverhalten und Lichtbogenlöschung bei hohen Strömen angeht. Axialmagnetfeldkontakte werden je nach angestrebten Nennkurzschlussstrom und Einsatzzweck in Durchmessern von ca. 50 mm bis 160 mm hergestellt.

2.4. Übliche Prüftechnik und Laborausstattung

Das heutige Verständnis über die physikalischen Vorgänge, die mit einem Schaltprozess im Vakuum verbunden sind, wurde durch zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten und Forschungsprojekte in den vergangenen 80 Jahren aufgebaut. Das Schalten von hohen Strömen war dabei nur eine von vielen Anwendungen, die im Laufe der Jahre durch den Erkenntnisgewinn dieser Arbeiten möglich wurde. Die Aufbauten, an denen diese Forschungsarbeiten durchgeführt wurden, und die an ihnen untersuchten Aspekte unterscheiden sich auf Grund ihrer starken Spezialisierung teilweise erheblich untereinander.

Die eingesetzte Messtechnik zur Untersuchung des Lichtbogenverhaltens beruhte bis heute größtenteils auf optischen Methoden. So beschreiben Pavelescu et al. in [Pav 2005; Pav 2007] ein System, welches mit Hilfe von Photosensoren das Vorbeilaufen eines kontrahierten Schaltlichtbogens an den Sensoren detektieren konnte. Auf diese Weise war es möglich, die Anzahl der Umdrehungen des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche zu zählen. Darüber hinaus wurde das Wellenlängenspektrum des vom Lichtbogen emittierten Lichtes analysiert.

Die bis heute mit Abstand am häufigsten angewandte Methode ist der Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras. Diese ermöglichen es bei richtiger Anwendung, bewegte Bilder des Schaltlichtbogens aufzuzeichnen. Die rasch voranschreitende Entwicklung leistungsfähiger CCD-Kameras in den vergangenen 15 Jahren hat diese Beobachtungsmethode stark unterstützt. Solche Aufbauten ermöglichten unter anderem die Untersuchung der Kathodenfleckbewegung, die Anodenfleckbildung und viele weitere wesentliche Aspekte der Schaltlichtbogengestalt.

Aufbauten, die den Einsatz von optischen Messverfahren ermöglichen, setzten eine Einblickmöglichkeit voraus. Die zu diesem Zweck entstandenen Aufbauten, die in der Literatur beschrieben werden, lassen sich in zwei Gruppen einteilen.

Zur ersten Gruppe gehören individuell angefertigte Spezialaufbauten, die mittels

einer Turbomolekularpumpe evakuiert werden. Diese Aufbauten werden auch als Pumpstände oder als Vakuumkammer bezeichnet. Das Vakuumgefäß ist in den meisten Fällen aus Rohrelementen der Vakuumtechnik gefertigt, wie sie hauptsächlich in der chemischen Industrie zum Einsatz kommen. Diese sind aus Edelstahl gefertigt und werden meist mit CF-Flanschen mit Kupferdichtungen gasdicht miteinander zum endgültigen Aufbau verbunden. Solche Rohrelemente werden von den Herstellern in vielfältigen Formen und normierten Durchmessern angeboten. Die Einblickmöglichkeit wird meist durch Blindflansche aus Spezialglas hergestellt. Drei Baugruppen, die für den Aufbau unverzichtbar sind, bereiten bei der Konstruktion Probleme, da sie keine Standardbauteile der Vakuumtechnik sind. Daher müssen diese Elemente für jeden Aufbau individuell angefertigt werden, was jeden einzelnen Aufbau zum Unikat macht.

1. Isolatorgehäuse mit CF-Flanschen, die das keramische Isoliergehäuse einer echten Vakuumröhre nachbilden sollen. Die gasdichte Verlotung von Keramiken mit Metallkomponenten stellte ebenfalls bei der Entwicklung von Vakuumröhren eine Herausforderung dar. Komponenten in den verhältnismäßig großen Abmessungen sind meist handgefertigte Einzelstücke.
2. Vakuumdichte Durchführungen, die in der Lage sind, Ströme von einigen 10 kA zu führen.
3. Der Metallfaltenbalg, der einen beweglichen und gleichzeitigen gasdichten Schaltkontakt ermöglicht.

Eine Möglichkeit, solche konstruktiven Probleme zu lösen, stellt die Verwendung von Komponenten echter kommerzieller Vakuumröhren dar. Diese werden modifiziert und mit CF-Flanschen versehen. Am häufigsten werden auf diese Weise die Stromdurchführungen aufgebaut. Die so entstandenen Aufbauten bieten ein Höchstmaß an Flexibilität in Bezug auf die Integration von Messtechnik und die Variation von Parametern wie Innendruck, Kontakthub und Geschwindigkeit. Sie erreichen jedoch bei weitem nicht die Kompaktheit von kommerziellen Vakuumröhren und somit auch nicht deren Verhalten, was die Verteilung der elektrischen und magnetischen Felder betrifft.

Die zweite Gruppe von Aufbauten zum Einsatz von optischen Messverfahren stellt die Modifikation kommerzieller Röhren dar. Hierbei wird der blickdichte, keramische Isolierkörper durch einen Glaskörper ersetzt. Der Vorteil eines solchen Aufbaus

ist die Möglichkeit, kommerzielle Schaltgeräte zu verwenden, die eine realistische Schaltbewegung ermöglichen. Ebenfalls ist das Vakuumvolumen nahezu identisch mit dem einer kommerziellen Röhre, so dass Restgaseinflüsse und die Druckwellenausbreitung sich weitgehend identisch verhalten dürften. Ein erheblicher Nachteil besteht darin, auf die Unterstützung von Herstellern für Vakuumröhren angewiesen zu sein, da nur diese über die nötigen Einrichtungen zur Herstellung verfügen.

In beiden Aufbauvarianten stellt der Metaldampfschirm eine weitere Sichtbarriere dar. Für dieses Problem finden sich in der Literatur ebenfalls ganz individuelle Lösungsansätze. In [Guo 2011] wird eine modifizierte Vakuumröhre mit Glasgehäuse beschrieben, deren Metaldampfschirm einen 40×40 mm großen Ausschnitt besitzt. Auf diese Weise soll die elektrische Feldverteilung im Inneren einer Röhre erhalten werden. Bei Glasröhren, die ganz auf einen Metaldampfschirm verzichten, wird die Innenseite der Glasröhre schnell mit Metaldampfkondensat beschichtet, so dass die Einblickmöglichkeit schwindet. Die Folge ist eine verkürzte Nutzungsdauer.

In [Wol 2012] wird ein Metaldampfschirm beschrieben, der auf 270 Grad aufgeschnitten war, um den Einblick aus zwei um 90 Grad zueinander versetzten Perspektiven zu ermöglichen. Viele Aufbaubeschreibungen von Pumpständen geben keine Auskunft über den Verbleib des Metaldampfschirmes oder weisen nur auf dessen Verzicht hin. In den meisten Fällen haben die gewonnenen Messergebnisse die Form von Hochgeschwindigkeitsvideos. Die Auswertung dient größtenteils der Gewinnung von Zahlenwerten, um sie mit anderen Messungen vergleichen zu können. Dies stellt eine Aufgabe dar, die in der Literatur auf verschiedene Weise gelöst wird. [Don 2010] beschreibt ein Verfahren, in dem Schwarz/Weiß Aufnahmen in Bereiche aufgeteilt werden, die durch ihre Graustufe definiert sind. Eine aufwendige Zuweisung von Grauton und Zugehörigkeit zur Lichtbogengestalt ermöglicht eine automatisierte Auswertung. Üblichere Methoden sehen eine Identifikation der Lichtbogenkonturen sowie der Kathoden- und Anodenflecken von Hand vor. Eine Auswertung jedes verwertbaren Bildes einer Videoaufnahme ermöglicht es, den zeitlichen Verlauf der Lichtbogengestalt zu untersuchen.

3. Zielsetzung der Arbeit

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Untersuchungsmethoden weisen teilweise erhebliche Unterschiede zu kommerziellen Vakuumschaltern auf. Dennoch stellen sie bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt das Mittel der Wahl dar, um die Wirkungsweise von neu entwickelten Kontaktsystemen sowie grundlegende Aspekte des Lichtbogenverhaltens zu untersuchen. Letztendlich dienen die so gewonnenen Ergebnisse der Weiterentwicklung von kommerziellen Vakuumschaltern. Derzeit besteht nicht die Möglichkeit, die fertig entwickelten Komponenten im Zusammenspiel in der fertigen Vakuumröhre auf die gleiche Weise zu untersuchen, wie es mit den einzelnen Komponenten möglich ist. An dieser Stelle besteht daher eine Lücke, die zwischen den Grundlagenuntersuchungen, den Entwicklungsuntersuchungen und dem fertigen Produkt klafft. Es ist folglich nicht mit Gewissheit zu sagen, ob die mit Hochgeschwindigkeitskameras gewonnenen Erkenntnisse über das Verhalten des Schaltlichtbogens auf kommerzielle Vakuumröhren direkt übertragbar sind. Das betrifft im wesentlichen folgende Punkte:

- Die Anwesenheit eines vollständigen Metaldampfschirmes ohne Modifikationen wie zum Beispiel einer Einblickmöglichkeit.
- Das Potential des Metaldampfschirmes: Je nach Röhrenmodell ist dieser ohne feste Potentialanbindung, also mit freiem Potential in der Röhre fixiert, oder mit dem Strompfad des Festkontaktes verlötet und somit fest mit seinem elektrischen Potential verbunden. Ein wesentlicher Grund für diese beiden unterschiedlichen Bauformen ist der Einfluss der Dampfschirmpolarität auf die elektrische Feldverteilung im Inneren der Röhre und somit auf ihre elektrische Spannungsfestigkeit im geöffneten Zustand. Einen Einfluss der Dampfschirmpolarität von vollständigen Dampfschirmen auf die Bewegungscharakteristik des Schaltlichtbogens bei handelsüblichen Vakuumschaltröhren konnte bisher nicht systematisch untersucht werden.

- Die im Vergleich zu einer Einblickröhre kompakten Abmessungen einer handelsüblichen Vakuumschaltröhre und das daraus resultierende sehr viel kleinere Vakuumvolumen.

Darüber hinaus sieht sich die Vakuumschalttechnik der Herausforderung gegenübergestellt, die Grenzen der Vakuumisolation hin zu höheren Spannungsebenen zu erweitern. Die damit verbundenen neuen Anforderungen an die Konstruktion erfordern im speziellen eine Optimierung des Zusammenspiels der Einzelkomponenten einer Vakuumröhre.

Die fehlende Einblickmöglichkeit von handelsüblichen Vakuumröhren verhindert den Einsatz der üblichen optischen Messtechnik. Eine einfache Möglichkeit, trotzdem Informationen aus dem Inneren der Röhre zu erhalten, ist das Messen der Lichtbogenbrennspannung. Es gibt zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen, die einen Zusammenhang zwischen Erscheinungsform des Lichtbogens mit dem Verlauf der Lichtbogenbrennspannung beschreiben. So ist es möglich, wie bereits beschrieben, die Bildung eines Anodenflecks aus der Lichtbogenbrennspannung zu identifizieren. Über die Bewegungscharakteristik des kontrahierten Lichtbogens konnten bisher aber keine genaueren Aussagen getroffen werden.

Um diese Lücke zu schließen, ist es nötig, auf konventionelle optische Messtechnik zu verzichten. [Tei 1999] beschreibt ein Verfahren, welches mit Hilfe von Sensorspulen die Bewegung des Lichtbogens in Inneren eines Pumpstandes detektiert. Aufgrund von erheblichen Einschränkungen, die mit dem Messprinzip verbunden sind, verwirft Teichmann dieses Verfahren wieder. Er führt jedoch keine detaillierte Begründung an. [Huh 1986] beschreibt einen Aufbau, der vier Hall-Sensoren verwendet, um den magnetischen Fluss im Außenbereich einer Vakuumröhre zu messen. Dieser vielversprechende Ansatz findet in der späteren Literatur keine weitere Erwähnung. Ein Grund hierfür könnte die schwere Vergleichbarkeit der so gewonnenen Messergebnisse mit den Informationen sein, die sich aus Videoaufnahmen extrahieren lassen.

Im Jahr 2009 entstand am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen des Vorgängerprojektes der vorliegenden Arbeit, durch Herrn Stefan Schäfer, ein Aufbau, der in Anlehnung an die Beschreibungen von Dr. Teichmann mit vier Sensorspulen arbeitet. Dieser Aufbau ist in [Sch 2009] beschrieben. Eine detaillierte, systematische Untersuchung der Messergebnisse, die dieses Messsystem ermöglicht, wurde im Zuge des damaligen Projektes nicht vorge-

nommen.

In Anbetracht der oben aufgeführten Punkte ergaben sich zu Beginn der vorliegenden Arbeit folgende Fragestellungen:

- Welche Informationen beinhalten die gemessenen Signale, und welche Aspekte der Lichtbogenbewegung lassen sich mit dem Spulen-basierten-Messsystem identifizieren und somit untersuchen?
- Welche Fehlereinflüsse gilt es zu berücksichtigen, und wie stark schränken diese die Aussagekraft der aufgezeichneten Ergebnisse ein?
- Wie weit lässt sich die Datenauswertung im Hinblick auf die genaue Lichtbogenposition mit einem magnetischen Messsystem in dem EMB belasteten Umfeld einer synthetischen Schalterprüfanlage entwickeln?
- Wie lässt sich das Messsystem nach einer detaillierten Analyse für den hier angestrebten Einsatzzweck weiterentwickeln?

In einem weiteren Schritt gilt es, die gewonnenen Messergebnisse in einer Form zu verwerten, dass sie einen Vergleich mit bisher durchgeführten Messergebnissen zulassen, welche mit konventionellen Methoden gewonnen wurden.

Für den Fall einer erfolgreichen Identifikation der Lichtbogenbewegung rückt ein weiterer Aspekt in den Fokus des Projektes. Die bisher entstandenen Untersuchungen von Lichtbogenerscheinungen und deren Verhalten wurden unter anderem von der verwendeten Messtechnik geprägt. Die Beobachtungsmöglichkeiten hatten somit einen erheblichen Einfluss auf die Darstellung der Lichtbogenzustände und deren Unterscheidung. Als Beispiele seien hier die oben erwähnten Verfahren des Graustufenmodells und die Positionsbestimmung anhand der Konturen der Lichtbogensäule aufgeführt. Auch dieses neue Verfahren erfordert es, entsprechend seiner Möglichkeiten und Einschränkungen, neue Grenzen zwischen den detektierbaren Erscheinungsformen zu definieren. Hierbei soll darauf geachtet werden, dass die gewünschte Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu konventionellen Methoden gewahrt bleibt, um die oben beschriebene Lücke schließen zu können.

4. Das Messprinzip

Wie bereits in Abschnitt 2.4 beschrieben, werden Untersuchungen an Schaltlichtbögen hauptsächlich an Spezialaufbauten mit Einblickmöglichkeit durchgeführt. Die üblichen Verfahren, um die Lichtbogenbewegung aufzuzeichnen, bedienen sich der Detektion der vom Lichtbogen emittierten elektromagnetischen Strahlung. Als Detektoren kommen hier hauptsächlich Hochgeschwindigkeitskameras zum Einsatz. Kommerzielle Vakuumröhren bieten aufgrund ihres geschlossenen Metaldampfschirmes und des undurchsichtigen Keramikgehäuses keine Einblickmöglichkeit. Daher kann die vom Lichtbogen emittierte elektromagnetische Strahlung, die sich für Hochgeschwindigkeitskameras im erkennbaren Wellenlängenbereich befindet, nicht den Außenbereich der Vakuumröhre erreichen. Um die Bewegungscharakteristik des Lichtbogens zu untersuchen, muss daher auf ein alternatives Messprinzip zurückgegriffen werden.

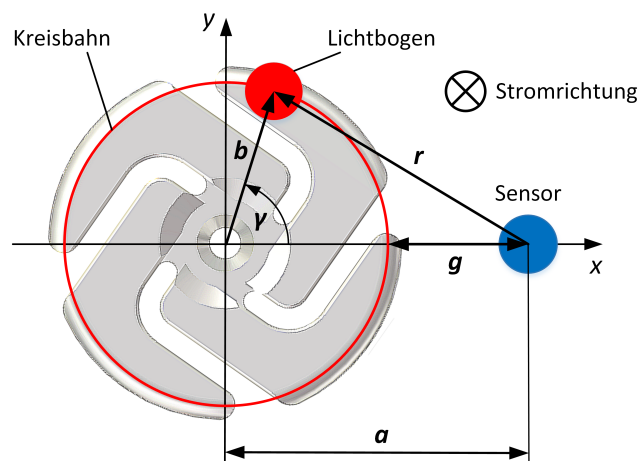


Abbildung 4.1.: Schematische Darstellung eines kontrahierten Schaltlichtbogens auf der Kontaktoberfläche

Der auszuschaltende Strom, der durch den Strompfad des Schalters sowie den Lichtbogen fließt, ruft ein Magnetfeld hervor. Im Gegensatz zur elektromagnetischen Strahlung kann sich dieses Magnetfeld durch die Komponenten der Vakuumschalt-röhre ausbreiten. Das in diesem Kapitel beschriebene Messprinzip sieht vor, dass das vom Lichtbogenstrom hervorgerufene Magnetfeld direkt an der Außenseite einer kommerziellen Vakuumröhre gemessen wird. In einem weiteren Schritt ist es anhand der Änderung des gemessenen Magnetfeldes möglich, Rückschlüsse auf die Bewegung und die Erscheinungsform des Lichtbogens zu schließen. In Abbildung 4.1 ist dieses Messprinzip skizziert. Man erkennt einen Spiralkontakt, auf dem sich ein kontrahierter Lichtbogen befindet. Der durch ihn fließende Strom ruft ein Magnetfeld hervor, welches von einem Sensor gemessen wird, der den Abstand r zum Lichtbogen hat. Vollzieht der kontrahierte Lichtbogen auf der Kontaktoberfläche eine Bewegung, so folgt das von ihm hervorgerufene Magnetfeld seiner Bewegung. Um das Messprinzip an dieser Stelle weiter zu erläutern, wird der kontrahierte Lichtbogen zu einem unendlich langen idealen Linienleiter vereinfacht. Der Betrag des Magnetfeldes, das sich um den Linienleiter ausbreitet, nimmt mit zunehmenden Abstand ab. Die resultierende magnetische Flussdichte lässt sich mit folgender Beziehung ausdrücken:

$$|B| = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}. \quad (4.1)$$

Diese Feldabnahme ist in Abbildung 4.2 für einen konstanten Strom von 20 kA dargestellt. Unterstellt man dem Lichtbogen eine runde Kreisbahn auf der Kontaktoberfläche, wie sie in Abbildung 4.1 als rote Linie dargestellt ist, so ergibt sich der Abstand zum Sensorpunkt aus folgender Beziehung:

$$r = \sqrt{\left(g - (b \cdot \cos \varphi)\right)^2 + (b \cdot \sin \varphi)^2}. \quad (4.2)$$

Werden von dem Lichtbogen ein oder mehrere Umläufe ausgeführt, so bewegt sich der Lichtbogen immer zwischen einem Minimal- und einem Maximalabstand zum Sensor. Um ein Zahlenbeispiel zu betrachten, sei hier ein Laufbahnradius b von 16 mm und ein Abstand a des Sensors zum Zentrum der Kreisbahn von 35 mm und einer Stromhöhe von 20 kA angenommen. Folglich führt der Lichtbogen während einer vollen Umdrehung eine Abstandsänderung zum Sensor im Bereich zwischen

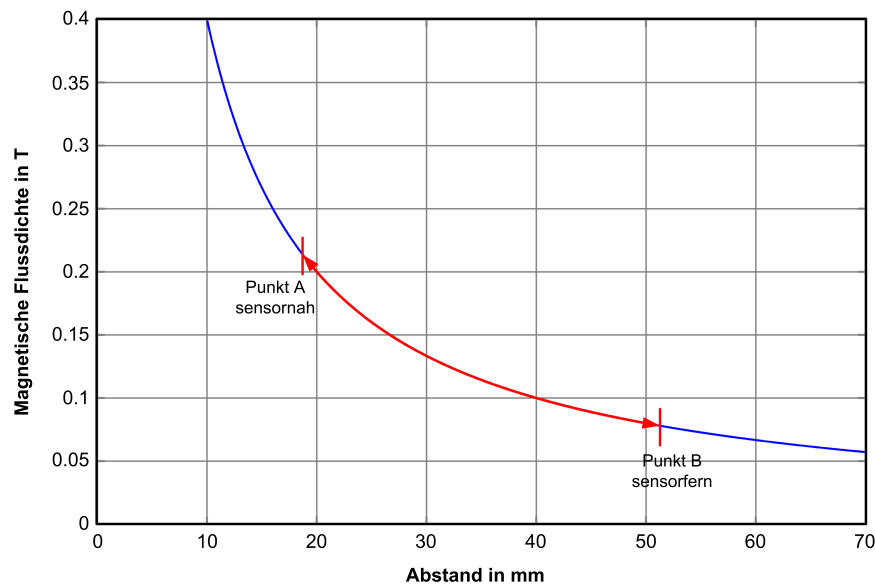


Abbildung 4.2.: Verlauf des berechneten magnetischen Feldes eines idealen Linienleiters in Abhängigkeit des Abstandes bei einem Strom von 20 kA. Rot markiert ist der Abstandsbereich, in dem sich der Lichtbogen für eine angenommene Messanordnung während einer Rotation auf der Kontaktoberfläche in Bezug zum Sensorpunkt bewegt.

19 mm und 51 mm aus. Überträgt man diese Abstandsänderung auf die zuvor erwähnte Magnetfeldverteilung um den Lichtbogen, so ergibt sich ein Bereich, der in Abbildung 4.2 rot gekennzeichnet ist. In diesem Bereich verändert sich die Magnetfeldstärke während eines Lichtbogenumlaufes. Berücksichtigt man in einem weiteren Schritt die Winkelgeschwindigkeit der Lichtbogenrotation, so lässt sich der Magnetfeldverlauf über die Zeit auftragen. In Abbildung 4.3 ist dies für eine Rotationsfrequenz von 1 kHz für 3 Umläufe dargestellt. Zusätzlich ist der zeitliche Verlauf des Abstandes r eingezeichnet. Nimmt man an, dass der dargestellte Feldverlauf das Ergebnis einer Messung ist, so wäre der Verlauf des Abstandes r jene Information, die von Interesse ist. In diesem stark vereinfachten Beispiel wäre es ohne weiteres mit Hilfe des Gesetzes von Biot-Savart möglich, den zu Beginn dieses Kapitels beschrittenen Weg umzukehren und aus dem Betrag des magnetischen Feldes den Abstand r zu berechnen.

Während einer Messung im Prüffeld treten eine Vielzahl verschiedenster Fehlereinflüsse auf, die den Verlauf des Magnetfeldes verändern. Um eine Interpretation der Messergebnisse möglich zu machen, und um die Bewegungscharakteristik des Licht-

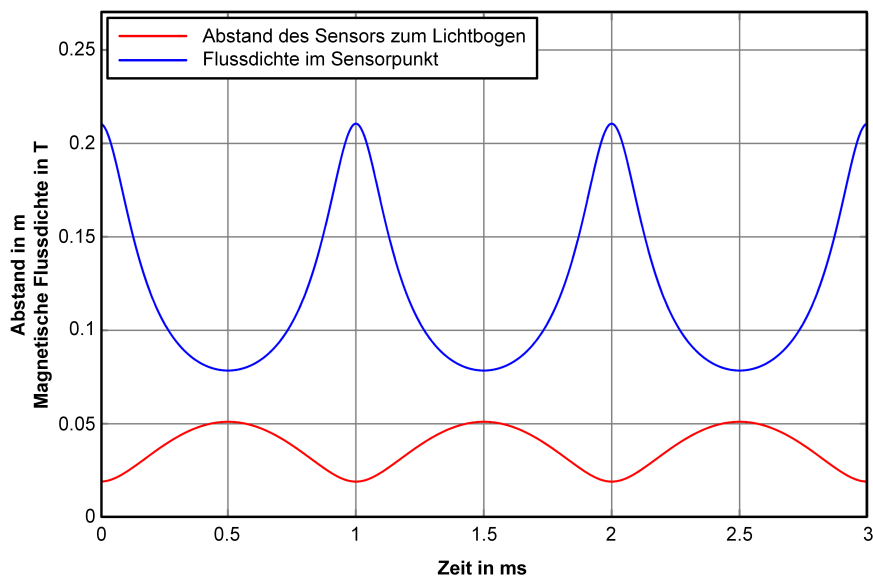


Abbildung 4.3.: Vergleich des berechneten Verlaufes der magnetischen Flussdichte im Sensorpunkt mit dem dazu gehörenden Verlauf des Abstandes des Lichtbogens zum Sensorpunkt bei einem Strom von 20 kA.

bogens korrekt zu erkennen, ist es notwendig, diese Einflüsse zu identifizieren und deren Effekt auf das gemessene Signal quantitativ zu ermitteln. Für eine weitere Betrachtung werden die Fehlereinflüsse in zwei Gruppen aufgeteilt. Zum einen gibt es Einflüsse, die durch die praktisch angewandte Messtechnik begünstigt oder hervorgerufen werden, folglich nicht direkt auf das Messprinzip zurückzuführen sind. Unter diese Kategorie würde beispielsweise das Übertragungsverhalten von Messleitungen unter extremen elektromagnetischen Beeinflussungen fallen. Zum anderen gibt es Einflüsse, die durch das Schaltgerät, die Einbauposition des Schaltgerätes in das Prüffeld und schließlich den Lichtbogen selbst verursacht werden. Diese Einflüsse treten folglich unabhängig von der verwendeten Messtechnik auf und werden dementsprechend immer zu berücksichtigen sein. In den folgenden zwei Kapiteln werden zwei Messsysteme beschrieben, die sich des vom Lichtbogenstrom hervorgerufenen Magnetfeldes bedienen, um Rückschlüsse auf die Bewegungscharakteristik des Lichtbogens zu ermöglichen. Es werden der Aufbau und die Funktionsweise beschrieben sowie die Fehlereinflüsse, die durch den Einsatz der jeweiligen Messtechnik hervorgerufen werden. In einem weiteren Kapitel werden jene Fehlereinflüsse beschrieben, die für beide Messsysteme gleichermaßen relevant sind.

5. Detektion der Lichtbogenbewegung mit Feldspulen

In diesem Kapitel wird ein Messsystem beschrieben, welches im Rahmen eines Vorgängerprojektes entstanden ist und in [Sch 2009] Erwähnung findet. Es wurde im Zuge der vorliegenden Arbeit weiterentwickelt, analysiert und eingesetzt. Dieses Messsystem detektiert mit Hilfe von 4 Sensorspulen die Magnetfeldveränderung im Außenbereich einer Vakuumschaltröhre. Entsprechend der in Kapitel 4 erläuterten Gesetzmäßigkeiten können in einem weiteren Schritt Rückschlüsse auf das Schaltlichtbogenverhalten im Inneren einer kommerziellen Vakuumschaltröhre getroffen werden, ohne auf eine direkte Einblickmöglichkeit angewiesen zu sein.

5.1. Wirkungsweise des Messsystems

Die prinzipielle Anordnung der vier Sensorspulen auf der Außenseite einer Vakuumschaltröhre ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Vereinfacht man den vom Strom durchflossenen Pfad einer Vakuumröhre zu einem Linienleiter, so nimmt das von ihm hervorgerufene Magnetfeld mit zunehmendem Abstand zu seinem Ursprung mit $1/r$ ab. Vollzieht der kontrahierte Lichtbogen auf der Kontaktoberfläche eine Bewegung, so folgt das von ihm hervorgerufene Magnetfeld seiner Bewegung. Die Sensorspulen sind an 4 festen Positionen auf der Höhe des Kontaktsystems an der Außenseite der Vakuumröhre positioniert. Durch die Lichtbogenbewegung verändert sich das Magnetfeld an den Positionen der Sensorspulen. Dies führt zu einem zeitlich veränderlichen magnetischen Fluss, der die Sensorspulen durchsetzt. Entsprechend den

5. Detektion der Lichtbogenbewegung mit Feldspulen

Spuleninduktivitäten werden in den Sensorspulen elektrische Spannungen induziert, welche messtechnisch erfasst werden können.

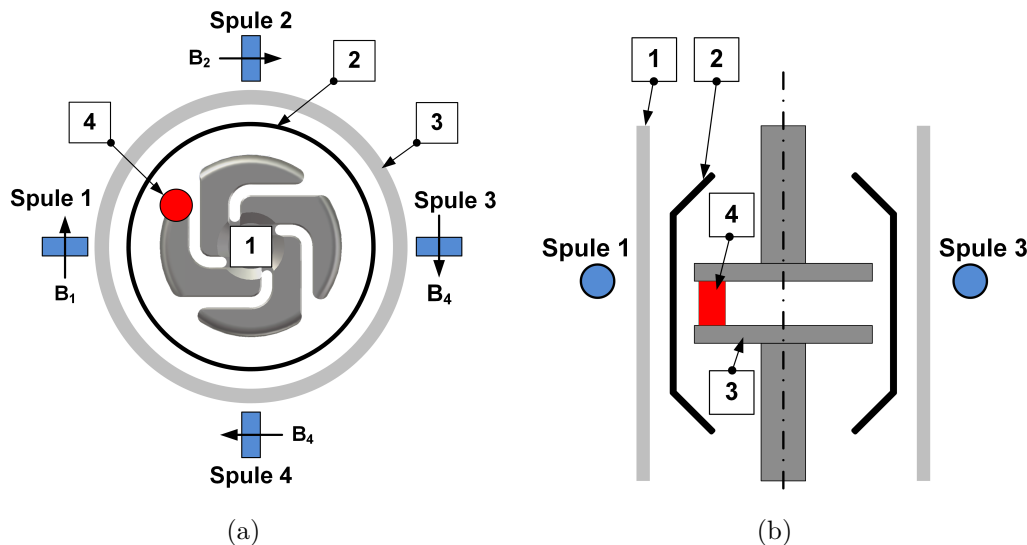


Abbildung 5.1.: a) Idealierte Draufsicht auf den Querschnitt einer Vakuumschaltröhre. Schematische Darstellung der vier Sensorspulen entlang der Außenseite des Keramikgehäuses 1) Spiralarmkontakt 2) Metaldampfschirm 3) Keramikgehäuse 4) Schaltlichtbogen
b) Idealierte Seitenansicht auf den Querschnitt einer Vakuumschaltröhre 1) Keramikgehäuse 2) Metaldampfschirm 3) Spiralarmkontaktscheiben 4) Schaltlichtbogen

Die so gemessenen vier Spulenspannungen enthalten im Wesentlichen zwei Informationen. Eine ist der Verlauf des Stromes, der für die Dauer einer Halbwelle mit Nennfrequenz fließt, und durch das Induktionsgesetz und der damit verbundenen zeitlichen Ableitung an dieser Stelle keine Sinusform mehr besitzt, sondern eine Cosinusform. Die zweite Information ist die zeitliche Ableitung des Abstandes des Lichtbogens zur jeweiligen Sensorspule. Aufgrund der Größenverhältnisse der Flussänderungen, die durch die Lichtbogenbewegung und die Sinusform des auszuschaltenden Stromes hervorgerufen werden, zeigt sich die Lichtbogenbewegung als eine höherfrequente Oberschwingung mit geringer Amplitude auf einer cosinusförmigen Grundschiwingung mit der Frequenz des Stromes.

5.2. Aufbau des Messsystems

Die vier Senserspulen sind aus lackisoliertem Kupferdraht mit einer Stärke 0,12 mm auf einen Acrylglaträger gewickelt. Der Spulendurchmesser beträgt 7 mm, was bei einer Windungszahl von 150 Windungen und einer Länge von 7 mm zu einer Induktivität von etwa 37 mH führt. Durch Fertigungstoleranzen schwanken die Induktivitäten der einzelnen Spulen um ± 5 Prozent. Zum Schutz vor elektromagnetischen Störungen und den während des Schaltprozesses auftretenden mechanischen Beanspruchungen sind die Senserspulen in Messinggehäuse eingefasst und werden über eine SMA-Buchse angeschlossen. Das resultierende Sensormodul ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Obwohl Messing im Vergleich zu Kupfer einen elektrischen Leitwert von weniger als 50 % hat, würde ein vollständig geschlossenes Gehäuse zu einer erheblichen Dämpfung des magnetischen Flusses führen und somit die Qualität des zu messenden Signales verringern. Daher haben die Messinggehäuse eine Bohrung, damit die Spulen auf ihren Stirnseiten frei sind.

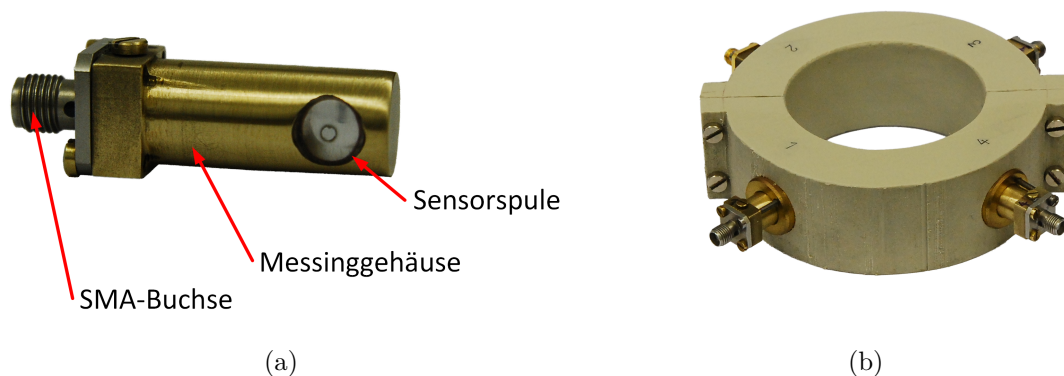


Abbildung 5.2.: a) Einzelnes Sensormodul
b) Kunststoffmanschette ausgerüstet mit allen 4 Sensormodulen

Eine Kunststoffmanschette, die auf der Höhe der Kontaktscheiben an der Außenseite einer handelsüblichen Vakuumschaltröhre befestigt wird, nimmt die Sensormodule auf. Die Manschette erfüllt mehrere Funktionen. Sie dient als Fixierung der Sensoren an klar zueinander definierten Punkten. Diese Punkte sind für eine spätere Interpretation der Messergebnisse und für einen Vergleich der einzelnen Spulenspannungen miteinander besonders wichtig. Des weiteren dient sie zur elektrischen Isolation der Sensormodule gegen die Vakuumröhre, da das Messsystem auch an

5. Detektion der Lichtbogenbewegung mit Feldspulen

Vakuumröhrenmodellen zum Einsatz gebracht wird, die einen nach außen geführten Metaldampfschirm besitzen. Dieser kann ein Potential bis zum Scheitelwert der wiederkehrenden Spannung annehmen und muss dementsprechend von den Sensormodulen isoliert werden. Schließlich dient die Kunststoffmanschette als Adapter, um das Messsystem an verschiedene Vakuumröhren anpassen zu können.

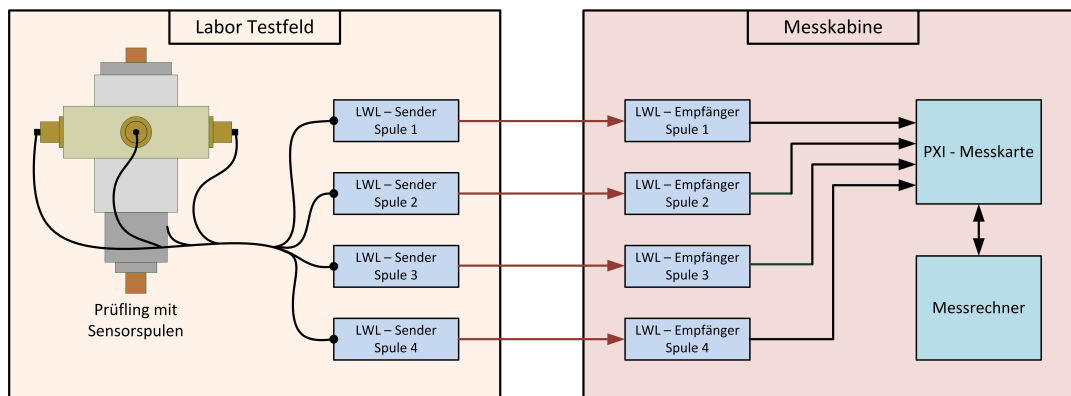


Abbildung 5.3.: Schematische Darstellung des gesamten Messsystems

Die von der Lichtbogenbewegung induzierten Spulenspannungen werden mit einem analogen Lichtwellenleitersystem (der Firma DG-Messtechnik mit einer Grenzfrequenz von 5 MHz) in die neben dem Prüffeld stehende Messkabine übertragen. Dort zeichnet eine PXI-Messkarte der Firma National Instruments mit vier simultan abgetasteten Kanälen die Signale mit einer Abtastfrequenz von 10 MHz auf. Auf diese Weise verhindert man ein Einkoppeln von elektromagnetischen Störungen über die mehr als vier Meter lange Distanz zwischen Prüfling und dem Messrechner. Die Sendeeinheiten des Lichtwellenleitersystems sind batteriebetrieben und erlauben es, Potentialunterschiede zu überwinden, die durch resistive Komponenten im Rückleiter des synthetischen Prüfkreises temporär auftreten können. Zusätzlich haben die Sendeeinheiten zusammen mit den 4 Sensormodulen kein festes Potential gegen die Vakuumröhre und reduzieren die Gefahr, die elektrische Feldverteilung im Außenbereich der Vakuumröhre negativ zu beeinflussen. Die beschriebene Messkette ist in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt.

Abbildung 5.4 zeigt eine einzelne Spulenspannung während eines Ausschaltprozesses bei einem Effektivwert des Stromes von 20 kA. Die Kontaktöffnung erfolgte 0,8 ms nach Strombeginn, was eine Lichtbogenzeit von 9,2 ms zur Folge hat. Man kann

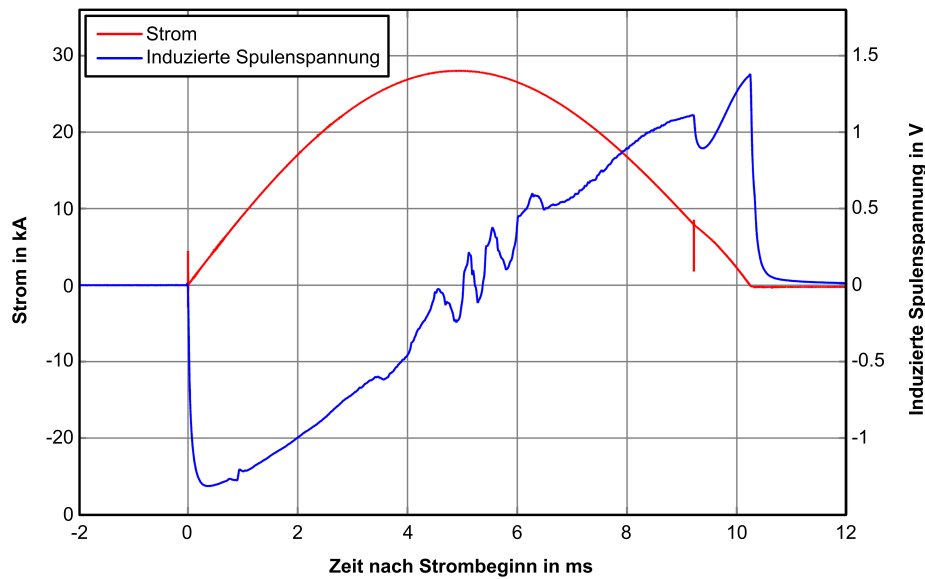


Abbildung 5.4.: Induzierte gemessene Spulenspannung während des Ausschaltens eines Stromes von 20 kA Effektivwert und einer Lichtbogenzeit von 9,2 ms.

die cosinusförmige Grundschiwingung des Signals erkennen, die durch die Sinusform des Stromes in die Sensorspule induziert wird. Des weiteren lässt sich eine Oberschwingung erkennen, die durch die Bewegung des kontrahierten Schaltlichtbogens hervorgerufen wird. Im Vergleich zur Gesamtlänge des Strompfades einer Vakuumröhre stellt der Lichtbogen nur einen Bruchteil dieser Länge dar und liefert somit nur einen kleinen Beitrag zum magnetischen Außenfeld. Daher ist die aus der Lichtbogenbewegung resultierende Modulation des magnetischen Flusses sehr viel kleiner als der magnetische Fluss, der durch den restlichen Strompfad hervorgerufen wird. Die Frequenz, mit der sich diese beiden Flussänderungen vollziehen, kann sich je nach Lichtbogengeschwindigkeit erheblich unterscheiden. Der starre Strompfad der Vakuumröhre wird eine Flussänderung in der Spule hervorrufen, die der Frequenz des Stromes entspricht. Das entspricht bei der Messung, die Abbildung 5.4 zugrunde liegt, 50 Hz. In dem Zeitbereich, in dem der Lichtbogen sich bewegt, vollführte er Bewegungen mit einer Rotationsfrequenz¹ von ca. 2,3 kHz. Bei einem Kontaktdurchmesser von 32 mm kann der Lichtbogen sich folglich maximal mit 231 m/s bewegt haben. Diese im Vergleich zu der 50-Hz-Grundschiwingung des Stromes hohe

¹An dieser Stelle ist die physikalisch korrekte Bezeichnung Umlaufgeschwindigkeit. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit mit den im weiteren Verlauf der Arbeit betrachteten Sensorsignalen wird dennoch die Bezeichnung Rotationsfrequenz beibehalten.

Frequenz der Lichtbogenbewegung führt zu einer hohen Änderungsrate des magnetischen Flusses in der Sensorspule und somit zu einer messbar hohen Spulenspannung. Da die Höhe der induzierten Spulenspannung von der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses abhängt und nicht von dessen absoluter Höhe, sind letztendlich zwei Aspekte für die Höhe der induzierten Spannung ausschlaggebend. Der erste Aspekt ist der Laufbahnradius des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche. Dieser gibt vor, zwischen welchem maximalen und minimalen Wert sich der magnetische Fluss während eines vollen Umlaufes bewegt. Dieser Sachverhalt ist in Abschnitt 4 genauer beschrieben. Der zweite Aspekt ist die Umlaufgeschwindigkeit des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche. Diese gibt vor, mit welcher Frequenz sich der magnetische Fluss in den Spulen zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert verändert. Das Zusammenspiel dieser beiden Aspekte wird von einer Reihe weiterer Faktoren beeinflusst, die in Abschnitt 5.4 genauer beschrieben und diskutiert werden. In Abbildung 5.4 ist im Verlauf der gemessenen Spulenspannung, ab etwa 9 ms nach Strombeginn, eine weitere Oberschwingung zu erkennen. Dabei handelt es sich um eine cosinusförmige Oberschwingung mit einer Frequenz von ca. 1 kHz. Ihr Ursprung liegt in dem injizierten Strom des Hochspannungskreises des synthetischen Prüffeldes und hat für die weitere Betrachtung des Messsystems sowie die Auswertung der gemessenen Lichtbogenbewegungen keine Bedeutung.

5.3. Mathematische Betrachtung

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, haben mehrere Faktoren einen Einfluss auf die Form und die Höhe der in den Sensorspulen induzierten Spannungen. Um diese Einflüsse nachvollziehen zu können und um zu verstehen, welche Informationen sich aus den Spulenspannungen letztendlich extrahieren lassen, wurde ein mathematisches Modell zur Beschreibung der wesentlichen Komponenten des Schaltvorgangs aufgestellt. Diesem Modell werden alle relevanten Parameter eines Schaltvorgangs, wie Strom, Kontaktöffnungsgeschwindigkeit und Verlauf der Lichtbogenposition übergeben. Das Resultat sind die induzierten Spannungen der vier Sensorspulen.

Abbildung 5.5 gibt einen Überblick über die vereinfachte Anordnung, die der mathematischen Nachbildung des Messsystems zugrunde liegt. Es sind ein Schnittbild

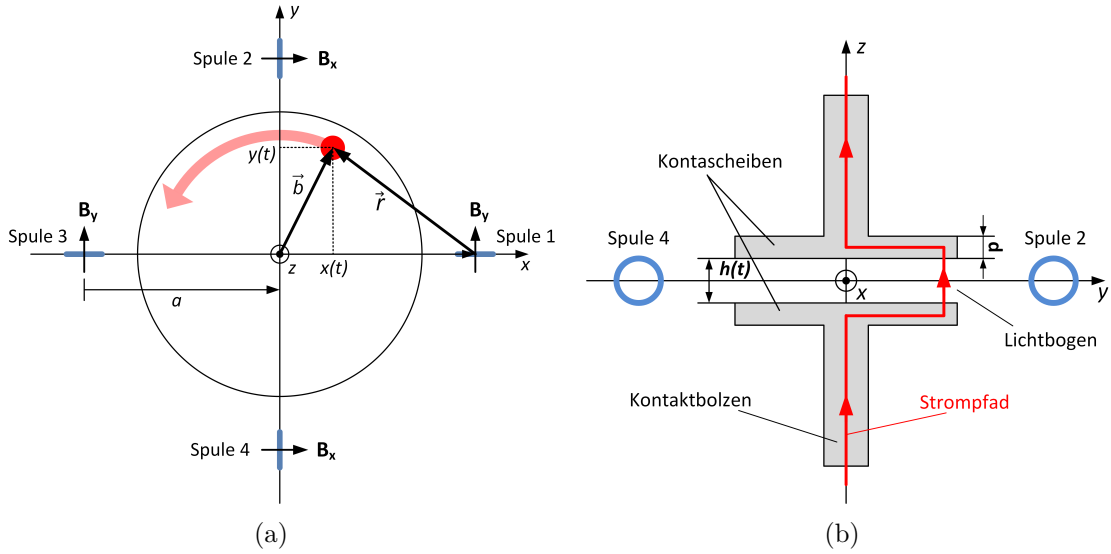


Abbildung 5.5.: a) Draufsicht auf die Kontaktoberfläche. Rot eingezeichnet die Position des kontrahierten Schaltlichtbogens.
b) Seitenansicht als Schnittbild der Messanordnung

der Kontaktbolzen und der Kontaktscheiben zu erkennen sowie die Draufsicht der Anordnung. Es sind alle geometrischen Größen eingezeichnet, die zur Erstellung des Modells erforderlich sind. Im Folgenden wird stellvertretend für alle vier Sensorspulen die senkrecht zur Spulenfläche stehende magnetische Feldstärke im Spulenmittelpunkt von Spule 1 berechnet. Dazu wird das Gesetz von Biot-Savart in folgender Form angewandt.

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{I(t)}{4\pi} \int_C \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad (5.1)$$

Im Rahmen dieser Betrachtung werden folgende Voraussetzungen und Vereinfachungen getroffen:

- Der Lichtbogen wird als infinitesimal dünner Stromfaden angenommen. Dieser ist in Abbildung 5.5 rot eingetragen.
- Der Lichtbogen steht senkrecht auf den beiden Kontaktscheiben. Auf diese Weise lässt sich die Anordnung im Bereich des Lichtbogens als längshomogen betrachten.

- Die Z-Position der Sensorspule wird während des Schaltvorgangs zu jedem Zeitpunkt als mittig zwischen den sich öffnenden Kontaktscheiben definiert. Dies ist in Realität nur bei geschlossenen Kontakten der Fall, da sich während eines Schaltvorgangs nur ein Kontakt bewegt, während der andere feststeht.
- Die Kontakte werden als kreisrunde Plattenkontakte, ohne besondere Kontaktgeometrie, mit infinitesimal kleiner Dicke angenommen.
- Es wird die magnetische Feldstärke im Mittelpunkt der Sensorspule bestimmt und für den Rest der Spulenfläche als gleichverteilt angenommen.

Wie in den Abbildungen 5.5 zu erkennen ist gibt es drei Quellen, aus denen sich das magnetische Feld im Mittelpunkt der Sensorspule zusammensetzt: die Strom durchflossenen Kontaktbolzen, die Kontaktscheiben und der Lichtbogen.

$$\vec{H}_{\text{ges},S1,y}(\vec{r}, t) = \vec{H}_{\text{Libo},S1,y}(\vec{r}, t) + \vec{H}_{\text{Kontakte},S1,y}(\vec{r}, t) + \vec{H}_{\text{Bolzen},S1,y}(\vec{r}, t) \quad (5.2)$$

Der Anteil, der durch die beiden Kontaktbolzen hervorgerufen wird, wird durch einen unendlich langen infinitesimal dünnen Linienleiter nachgebildet, aus dem im Bereich des Kontaktpaltes ein Stück in der Länge des Lichtbogens herausgeschnitten wurde. Die reale Stromverteilung in den Kontaktscheiben ist schwer zu bestimmen und wird im wesentlichen durch die Kontaktgeometrie beeinflusst. Da der Strom in den hier betrachteten Spiralkontakten hauptsächlich in der XY-Ebene fließt und die Kontaktscheibe infinitesimal dünn angenommen wurde, wird das von ihm hervorgerufene Magnetfeld einen sehr geringen Beitrag zur Feldkomponente leisten, die die Spulenfläche senkrecht durchdringt. Um die hier beabsichtigten Untersuchungen durchführen zu können, können daher die Strompfade durch die Kontakte vernachlässigt werden.

Der Lichtbogen selbst wird ebenfalls durch einen infinitesimal dünnen Linienleiter nachgebildet. Die Länge des Lichtbogens entspricht der jeweiligen Größe des Kontaktpaltes. Seine Position und seine Bewegung in XY-Richtung können frei gewählt werden, um so die Lichtbogenbewegung eines realen Kontaktsystems nachzubilden.

Das sich damit ergebende Magnetfeld im Mittelpunkt von Sensorspule 1, welches senkrecht zur Spulenfläche steht, lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$|H_{\text{ges},S1,y}(\vec{r}, t)| = \frac{I(t)}{4\pi} \cdot \left(\frac{2}{a} - \frac{h(t)}{a\sqrt{a^2 + \left(\frac{h(t)}{2}\right)^2}} + \frac{(a - x(t)) \cdot h(t)}{\left((a - x(t))^2 + y(t)^2\right)\sqrt{(a - x(t))^2 + y(t)^2 + \left(\frac{h(t)}{2}\right)^2}} \right). \quad (5.3)$$

Der Abstand der Kontaktscheiben zueinander ist wesentlich kleiner als der Abstand der Sensorspule zum Ursprung des Koordinatensystems, welches sich im Mittelpunkt der gesamten Anordnung befindet. Daher lässt sich folgende Vereinfachung treffen:

$$h(t) \ll a. \quad (5.4)$$

Auf diese Weise lässt sich der Ausdruck für das Magnetfeld stark vereinfachen.

$$|H_{\text{ges},S1,y}(\vec{r}, t)| \approx \frac{I(t)}{4\pi} \cdot \left(\frac{2}{a} + \frac{(a - x(t)) \cdot h(t)}{\left((a - x(t))^2 + y(t)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (5.5)$$

Mit Hilfe eines identischen Rechengangs lassen sich auch die Magnetfelder für die restlichen 3 Sensorspulen berechnen. Im Bereich der Sensorspulen befinden sich hauptsächlich Polypropylen, Acrylglas und Messing. Die Spule selbst ist aus Kupferdraht gefertigt. Darüber hinaus sind sämtliche Materialien, die sich sonst noch im Bereich des Messsystems befinden, nicht ferromagnetisch. Daher lässt sich mit guter Näherung $\mu = \mu_0$ annehmen.

$$\vec{B}(t) = \mu_0 \cdot \vec{H}(t) \quad (5.6)$$

Durch Anwendung des Induktionsgesetzes kann die induzierte Spulenspannung aus der magnetischen Flussdichte, die die Spule durchdringt, berechnet werden. Da hier

bereits die Feldkomponente senkrecht zur Spulenfläche vorliegt, lässt sich die allgemeine vektorielle Form des Induktionsgesetzes in die einfachere skalare Schreibweise überführen.

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot A \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (5.7)$$

Die vorliegende magnetische Flussdichte ist von mehreren zeitabhängigen Faktoren abhängig. Daher ist es notwendig, das vollständige Differential zu bilden.

$$\frac{dB}{dt} = \left(\frac{\partial B}{\partial I} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{\partial B}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial B}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{\partial B}{\partial h} \cdot \frac{dh}{dt} \right) \quad (5.8)$$

Angewandt auf den Ausdruck für die magnetische Flussdichte in Sensorspule 1 ergibt sich folgende Differentialgleichung für die in der Spule induzierte Spannung:

$$\begin{aligned} \frac{dB_{\text{ges},S1,y}}{dt} = & \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \left(\frac{2}{a} + \frac{h(t)(a-x(t))}{\left((a-x(t))^2 + y(t)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right) \cdot \frac{dI}{dt} \right. \\ & + I(t) \cdot \frac{h(t)(2(a-x(t))^2 - y(t))}{\left((a-x(t))^2 + y(t)^2\right)^{\frac{5}{2}}} \cdot \frac{dx}{dt} \\ & - I(t) \cdot \frac{3 \cdot h(t) \cdot y(t)(a-x(t))}{\left((a-x(t))^2 + y(t)^2\right)^{\frac{5}{2}}} \cdot \frac{dy}{dt} \\ & \left. + I(t) \cdot \frac{a-x(t)}{\left((a-x(t))^2 + y(t)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{dh}{dt} \right\} = -\frac{U_{\text{ind},S1}}{n \cdot A} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Dieser Rechengang lässt sich identisch für alle vier Sensorspulen entsprechend der geometrischen Lage der jeweiligen Spule zum Kontaktsystem durchführen. Das Resultat sind vier Differentialgleichungen, die in ein Matlab-Simulink-Programm eingebunden werden. Die Eingangsgrößen sind die zeitlichen Verläufe des Stromes, des Kontakthubes und der Position des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche. Zusätzlich müssen alle relevanten geometrischen Größen der Anordnung angegeben werden.

Auf diese Weise ist es möglich, die vier Differentialgleichungen der induzierten Spulenspannungen numerisch zu behandeln.

Abbildung 5.6 zeigt die simulierte magnetische Flussdichte während eines Ausschaltprozesses. Dabei wurden folgende Parameter vorausgesetzt:

Tabelle 5.1.: Vorgegebene Parameter des simulierten Ausschaltprozesses, der Abbildung 5.6 zugrunde liegt.

Stromhöhe (eff.)	20 kA
Frequenz des Stromes	50 Hz
Laufbahnradius	15 mm
Zeitpunkt der Kontakttrennung	3 ms nach Strombeginn
Rotationsfrequenz	1400 Hz
Kontaktgeschwindigkeit	1 m/s

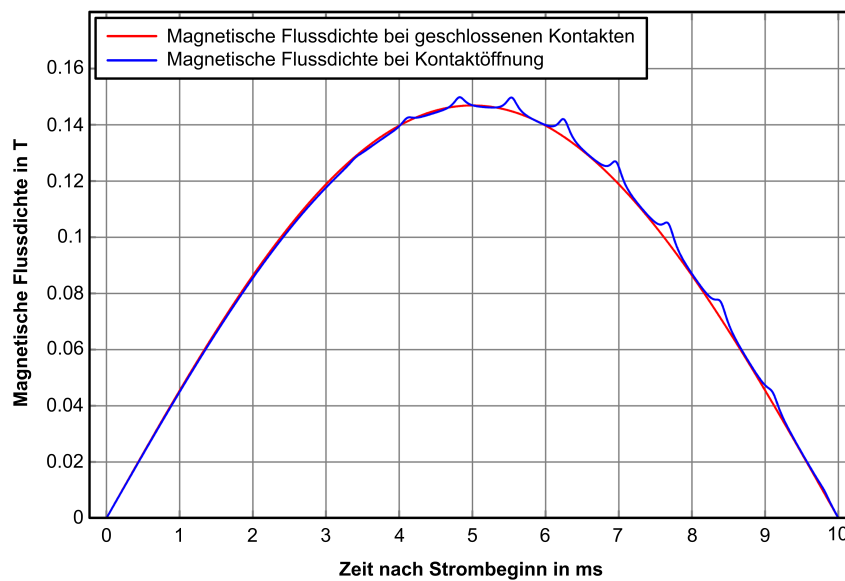


Abbildung 5.6.: Simulierter Verlauf der magnetischen Flussdichte im Mittelpunkt von Senserspule 1 für das Ausschalten eines Stromes von 20 kA Effektivwert bei einer Lichtbogenzeit von 7 ms und einer Rotationsfrequenz von 1400 Hz mit einem Laufbahnradius von 15 mm.

Es sind zwei Verläufe magnetischer Flussdichten zu erkennen. Rot dargestellt ist der Verlauf, der sich für den Fall ergibt, wenn die Kontakte geschlossen bleiben und somit kein Lichtbogen entsteht. Blau dargestellt ist der Verlauf der magnetischen Flussdichte, die sich ergibt, wenn ein Schaltvorgang stattfindet. Das Grundsignal, welches von der 50-Hz-Stromhalbschwingung hervorgerufen wird, ist dominant und

klar erkennbar. Der blaue Verlauf weist zusätzlich ein aufmoduliertes Signal mit einer Frequenz von 1400 Hz auf. Diese Oberschwingung ist das von der Lichtbogenbewegung hervorgerufene Signal. Dabei identifiziert jeder Peak einen Vorbeilauf des Lichtbogens an der Senserspule. Ein Vergleich mit Abbildung 4.3 verdeutlicht zudem die Ähnlichkeit der Form der Spitzen, die durch das Vorbeilaufen des Lichtbogens entstanden sind. Zu Beginn der Stromhalbschwingung sind die Kontakte geschlossen. Die Kontakttrennung findet 3 ms nach Strombeginn statt. Ab diesem Zeitpunkt bewegen sich die Kontakte mit einer Geschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde auseinander. Der Lichtbogen wächst dementsprechend ab dem Moment der Kontakttrennung mit 1 m/s. Somit nimmt der Anteil des Strompfades stetig zu, der in den Senserspulen ein der Rotationsfrequenz des Lichtbogens entsprechend pulsierendes Magnetfeld hervorruft. In Abbildung 5.6 ist dies anhand der zunehmenden Amplitude des aufmodulierten Signals erkennbar. Nach dem Stromscheiden, 5 ms nach Strombeginn, bewirkt der sinkende Strom eine Abnahme der magnetischen Flussdichte.

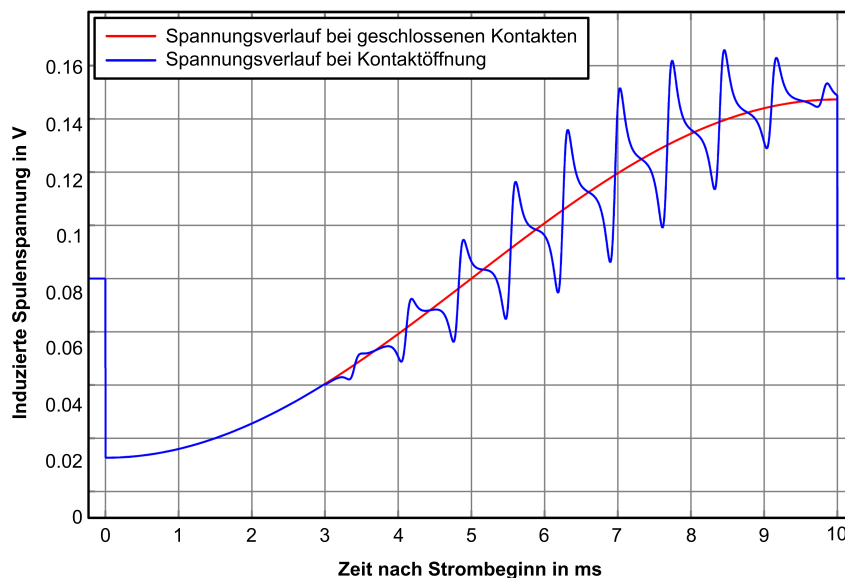


Abbildung 5.7.: Simulierter Verlauf der induzierten Spannung in Senserspule 1 für das Ausschalten eines Stromes von 20 kA Effektivwert bei einer Lichtbogenzeit von 7 ms und einer Rotationsfrequenz von 1400 Hz mit einem Laufbahnradius von 15 mm.

Nachdem der Spulenquerschnitt und die Windungszahl berücksichtigt wurden, kann durch Bildung des totalen Differentials die induzierte Spulenspannung berechnet

werden. Diese ist für den hier simulierten Schaltvorgang in Abbildung 5.7 dargestellt. Zusätzlich ist der Verlauf der induzierten Spulenspannung für den Fall geschlossener Kontakte dargestellt. Die Grundschiwingung in Form einer halben negativen Cosinus-halb-welle ist klar zu erkennen. Ihre Ursache liegt in der Sinushalb-welle des Stromes, die mit dem Verlauf einer negativen Cosinushalb-welle durch das Induktionsgesetz eine Spannung induziert. Die durch die Lichtbogenbewegung induzierte Oberschwin-gung weist eine charakteristische Form auf, deren fallende Flanken einen Sattelpunkt aufweisen. Wie bereits in Abschnitt 4 beschrieben wurde, führt die Bewegung des Lichtbogens zu einem Verlauf der magnetischen Feldstärke in den Spulenspul-nen, des-sen Maxima spitz ausgeprägt sind, wohingegen die Minima eine flache Ausprägung aufweisen. Dieser Verlauf ist die Ursache für die charakteristische Form der sich ergebenden Spulenspannung.

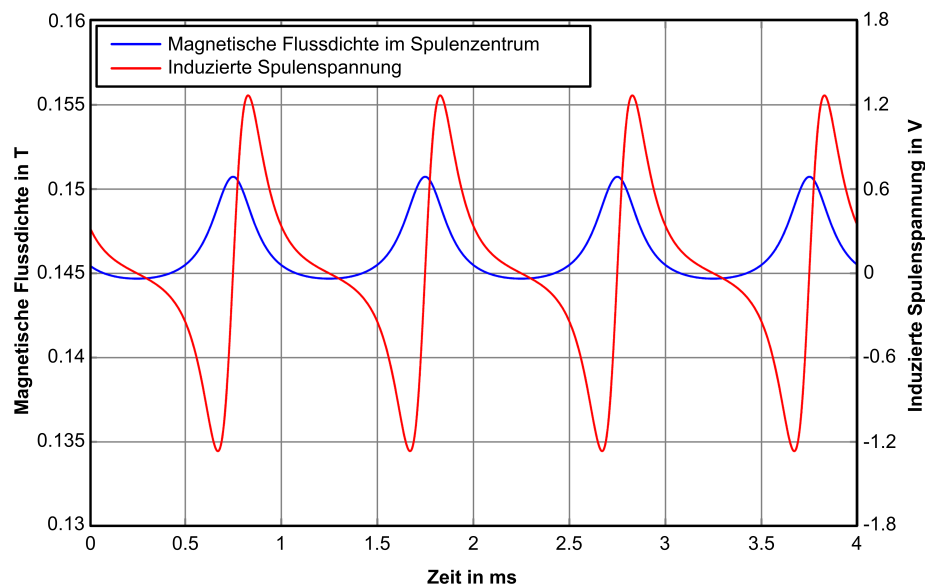


Abbildung 5.8.: Vergleich des Verlaufes der berechneten magnetischen Flussdichte und der sich daraus ergebenden induzierten Spulenspannung für das Schalten eines Gleichstromes von 20 kA bei einem konstanten Kontaktd Abstand von 3 mm.

Um aus der Spulenspannung Rückschlüsse auf die Position des Lichtbogens ziehen zu können, ist in Abbildung 5.8 der Verlauf der magnetischen Flussdichte im Spulenzentrum zusammen mit der sich daraus ergebenden Spulenspannung aufgetragen. Bis auf die Lichtbogenbewegung wurden alle variablen Parameter des Schaltvorgangs bei dieser Simulation als konstant gesetzt. In Tabelle 5.2 sind die Parameter dieser Simulation aufgeführt.

Tabelle 5.2.: Vorgegebene Parameter der Simulation der magnetischen Flussdichte und der induzierten Spulenspannung, die Abbildung 5.8 zugrunde liegen

Gleichstromhöhe	20 kA
Frequenz des Stromes	0 Hz
Laufbahnradius	15 mm
Zeitpunkt der Kontakttrennung	3 ms nach Strombeginn
Rotationsfrequenz	1000 Hz
Kontaktgeschwindigkeit	0 m/s

Aus dem Verlauf der magnetischen Flussdichte lässt sich die Position des Lichtbogens ableiten. So befindet sich der Lichtbogen während der Maxima der Sensorspule am nächsten. Gemäß Abbildung 4.1 würde das einem Winkel von $\gamma = 0$ Grad entsprechen, was folglich einen Vorbeilauf des Lichtbogens an der Sensorspule bedeutet. Für die induzierte Spulenspannung ergibt sich gemäß dem Induktionsgesetz ein Nulldurchgang mit positiver Steigung. Die Position dieses Nulldurchgangs ist in Abbildung 5.8 einfach zu lokalisieren, da der zugrundeliegende Strom nur Gleichanteile besitzt und dem entsprechend keine zusätzliche Spannung in die Sensorspule induziert. Bei einem realen Ausschaltprozess mit einem sinusförmigen Strom verhindert die cosinusförmige Grundschiwingung ein leichtes Erkennen dieser Nulldurchgänge. Eine Möglichkeit, auf einfache Weise das Vorbeilaufen des Lichtbogens mit hinreichender Genauigkeit aus den Spulenspannungen zu identifizieren, bieten die Maxima der Spulenspannungen, die zeitlich sehr dicht den gesuchten Nulldurchgängen folgen. Abbildung 5.9 zeigt eine einzelne gemessene Spulenspannung während eines realen Ausschaltvorgangs eines Stromes von 25 kA Effektivwert. Der verwendete Spiralkontaktdurchmesser betrug bei dieser Messung 45 mm. Es lassen sich 17 positive Spannungsmaxima identifizieren, die auf ein siebzehnmaliges Vorbeilaufen des Lichtbogens an der Sensorspule schließen lassen. Der Verlauf der jeweils negativen Flanken nach den Spannungsmaxima weist in einigen Fällen die gleiche charakteristische Form auf, wie sie auch in Abbildung 5.7 zu erkennen ist.

Anhand der Höhe der Spannungsmaxima lässt sich keine Aussage über die tatsächliche Lichtbogenbahn treffen. Der Grund für diese Beschränkung liegt in der Bildung des totalen Differentials des magnetischen Flusses. Gemäß dem Induktionsgesetz führt jede Änderung des magnetischen Flusses durch die Sensorspule zu einer induzierten Spannung. Der Schaltvorgang setzt sich aus mehreren Faktoren zusammen, die einen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des magnetischen Flusses in den

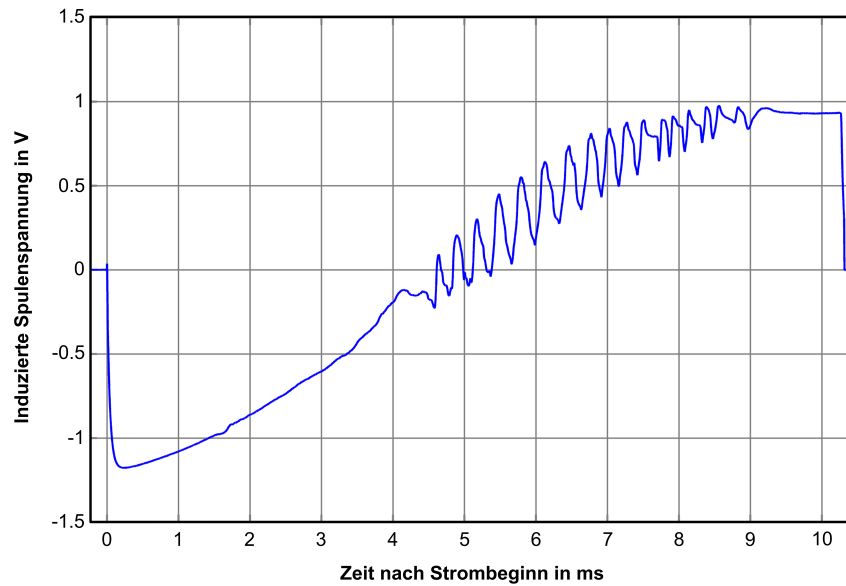


Abbildung 5.9.: Gemessene induzierte Spulenspannung während des Ausschalten eines Stromes von 20 kA Effektivwert und einer Lichtbogenzeit von 8,4 ms. Der Durchmesser der Spiralarmkontakte betrug 45 mm.

Sensorspulen ausüben. Einige dieser Faktoren hängen mit der Lichtbogenbewegung nicht zwangsläufig zusammen. Daher lässt sich ohne Kenntnis des zeitlichen Verlaufes dieser Faktoren während des Ausschaltvorgangs die Lichtbogenposition aus den Spulenspannungen nicht rekonstruieren. Ein Überblick und eine Beschreibung der relevantesten dieser Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf das Messergebnis werden in den Abschnitten 7 und 5.4 gegeben.

Abbildung 5.10 zeigt das Resultat einer Simulation, deren Eingabeparameter angepasst wurden, um die Simulationsergebnisse der realen Messung aus Abbildung 5.9 anzunähern. Aufgrund der zu Beginn dieses Abschnittes aufgeführten Vereinfachungen, die diesem Simulationsmodell zugrunde liegen, sind die hier getroffenen Eingabeparameter unrealistisch und weisen eine erhebliche Diskrepanz zu einem realen Ausschaltvorgang auf. Dennoch dient der Vergleich zur Identifikation eines entscheidend wichtigen Effekts. Die Grundschiwingung beider Spulenspannungen sollte eine halbe Periode einer negativen Cosinusschwingung sein. Diese ist in der simulierten Spannung in guter Qualität enthalten. Die real gemessene Spulenspannung zeigt Abweichungen, die besonders zu Beginn und am Ende des Signals zu erkennen sind. Die Ursachen für diese Abweichungen sind vielfältige EMB-Einflüsse entlang der gesam-

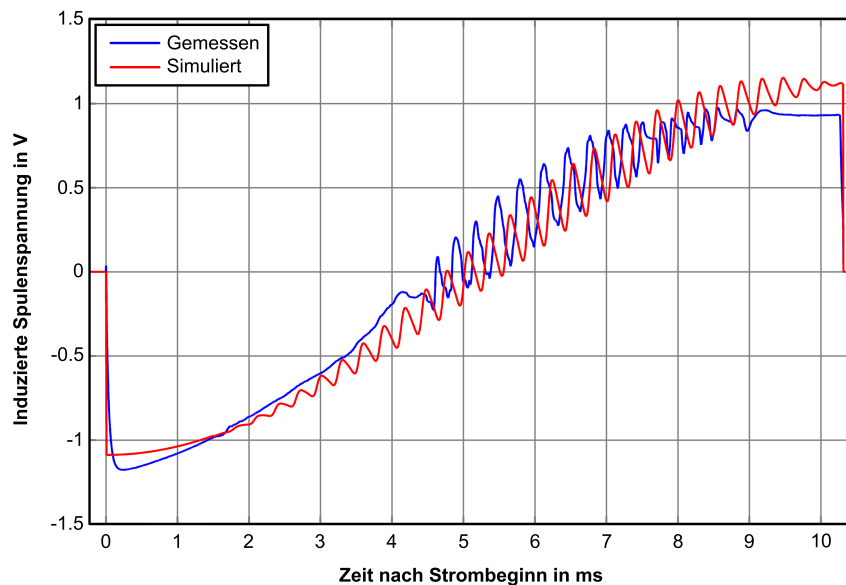


Abbildung 5.10.: Vergleich einer gemessenen und einer simulierten Spulenspannung.

ten Messkette, die im weiteren Verlauf noch Erwähnung finden. In einem weiteren Schritt wurde aus dem hier beschriebenen Simulationsmodell, welches aus einer vorgegebenen Position die Spulenspannungen berechnet, ein Umkehrmodell entwickelt, welches theoretisch aus den Spulenspannungen die Position berechnet. Das Resultat ist ein Satz aus 4 Differentialgleichungen. Dieses Modell ermöglicht es, für Spulenspannungen, die mit dem ursprünglichen Simulationsmodell simuliert wurden, die zu Beginn vorgegebene Lichtbogenbahn aus den Spulenspannungen zu rekonstruieren. Das Einspeisen von real gemessenen Spulenspannungen führt jedoch zur Divergenz des Systems und somit zu einem Abbruch des Solvers. Der Grund für die Instabilität des Systems bei Verwendung realer Messwerte liegt in den starken Vereinfachungen, die dem ursprünglichen Simulationsmodell zugrunde liegen. Zusätzlich beinhalten die realen Spulenspannungen, wie bereits erwähnt, eine Reihe von EMB-Effekten, die sich mathematisch nicht behandeln lassen.

5.4. Messsystemspezifische Fehlereinflüsse

Der Einsatz von Spulen als Feldsensoren bedingt eine Reihe von spezifischen Effekten, die das Messergebnis beeinflussen. In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Faktoren beschrieben, die bei der Auswertung der Messergebnisse berücksichtigt werden sollten.

5.4.1. Die effektive Spulenfläche

Ein gewichtiger Vorteil der Vakuumschalttechnik ist die resultierende kompakte Bauform der einzelnen Vakuumschaltröhren. Der Grund hierfür liegt größtenteils in den sehr guten dielektrischen Eigenschaften von Vakuum als Isoliermedium. Das Resultat sind kurze Isolationsabstände, die kurze Kontaktabstände und kurze Abstände zwischen dem Kontaktsystem, dem Dampfschirm und dem Außengehäuse ermöglichen. Die Dimension des Strompfades wird hauptsächlich von der Stromtragfähigkeit des verwendeten Leitermaterials bestimmt. Der Kontaktdurchmesser wird hauptsächlich durch die Stromtragfähigkeit und das Abbrandverhalten des Kontaktwerkstoffes bestimmt. Vergleicht man die sich ergebenden Proportionen einer Vakuumschaltröhre mit denen eines vergleichbaren Leistungsschalters, der ein anderes Isoliermedium einsetzt, so weisen Vakuumschalter ein kleines Vakuumgefäß auf, in dem sich ein verhältnismäßig großes Kontaktsystem befindet. Der Vorteil dieser Proportionen ist die Möglichkeit, die Sensorspulen nur wenige Zentimeter entfernt vom Kontaktsystem positionieren zu können. Während einer Umdrehung des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche ergibt sich so, gemäß Abbildung 4.2, eine größere Veränderung der magnetischen Flussdichte. Dies führt zu einer höheren induzierten Spannung und somit einem größeren Anteil des Nutzsignals in der gemessenen Spulenspannung.

Ein Nachteil der kompakten Abmessungen ist in Abbildung 5.11 schematisch dargestellt. Wesentlich für die in einer Spule induzierte Spannung ist die Spulenfläche, die senkrecht von einem sich zeitlich verändernden magnetischen Fluss durchsetzt wird. Dies ist nur dann der Fall, wenn sich der Lichtbogen gemäß Abbildung 5.11 auf der X-Achse befindet. Für alle restlichen Positionen gilt die sogenannte „effektive Spulenfläche“. Diese ist eine Projektion der ursprünglichen Spulenquerschnittsfläche

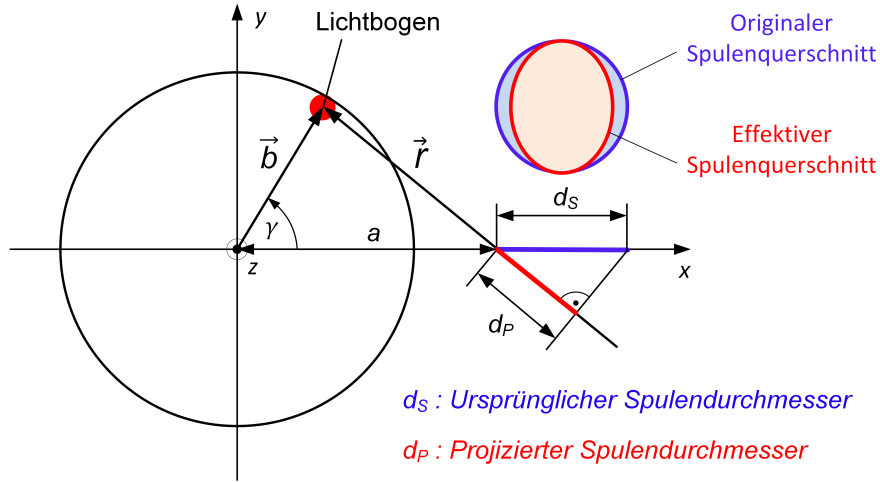


Abbildung 5.11.: Schematische Darstellung der Kontaktoberfläche und die aus der Lichtbogenposition resultierende effektive Spulenfläche.

auf die Fläche, die von dem Magnetfeld orthogonal durchdrungen wird. Da die Bewegung des Lichtbogens auf der XY-Ebene stattfindet, hat dies nur Einfluss auf den Spulendurchmesser in XY-Richtung. Der Spulendurchmesser in Z-Richtung bleibt unverändert. Die sich so ergebende effektive Spulenfläche erfährt eine Stauchung in XY-Richtung während eines Lichtbogenumlaufes und verformt sich so zu einer Ellipse. Der Verlauf des Durchmessers der projizierten Ellipse d_P kann mit Gleichung 5.10 beschrieben werden.

$$d_P(\gamma) = \frac{\pi}{4} \cdot d_S^2 \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{b \cdot \sin \gamma}{a - (b \cdot \cos \gamma)}\right)\right) \quad (5.10)$$

Abbildung 5.12 zeigt die Änderung der sich aus diesem Effekt ergebenden effektiven Spulenfläche während eines Lichtbogenumlaufes. Zu erkennen sind zwei Verläufe, die jeweils die geometrischen Verhältnisse der im weiteren Verlauf dieser Arbeit untersuchten Kontaktgeometrien berücksichtigen. Dabei wurde in beiden Fällen angenommen, dass der Lichtbogen sich auf dem maximal möglichen Bahnradius bewegt, um einen Eindruck über den größtmöglichen Einfluss dieses Effektes zu geben. Es ist zu erkennen, dass je nach Kontaktdurchmesser sich eine Abweichung von 9 % bzw. 14,2 % ergibt. Ein Vergleich mit Abbildung 5.8 lässt erkennen, dass während eines Lichtbogenumlaufes, kurz nach dem Vorbeilauf des Lichtbogens an der Sensorspule, die magnetische Flussdichte ihre größte negative Steigung aufweist. Folglich befindet

sich an dieser Stelle ein positiver Peak in der induzierten Spulenspannung. Zusätzlich reduziert sich die effektive Spulenfläche auf diesem Abschnitt der Lichtbogenbahn von ihrem Maximum zu ihrem Minimum. Der resultierende magnetische Fluss, der die Spule durchsetzt, wird somit durch die Abnahme der magnetischen Flussdichte und durch die Abnahme der effektiven Spulenfläche verringert. Dadurch erhöht sich die induzierte Spulenspannung und folglich auch das Spannungsmaximum zu diesem Zeitpunkt. Das höhere Spannungsmaximum ist zunächst von Vorteil für die Identifikation der Lichtbogenbewegung. Jedoch bedeutet der Effekt der sich laufend ändernden effektiven Spulenfläche einen weiteren Faktor, der bei einer mathematischen Behandlung der Spulenspannung berücksichtigt werden muss.

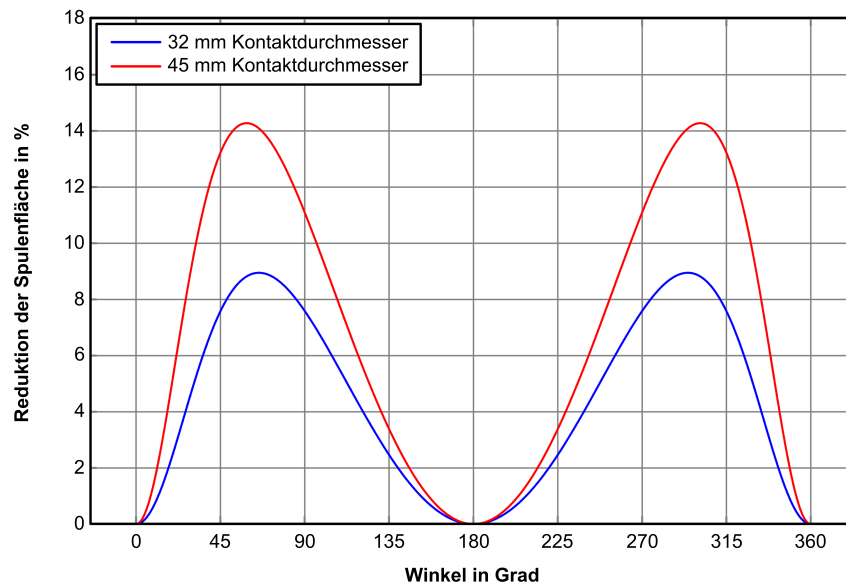


Abbildung 5.12.: Reduktion der effektiven Spulenfläche während einer vollständigen Rotation des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche unter Annahme des maximal möglichen Bahnradius des Lichtbogens.

Eine genauere Betrachtung der geometrischen Verhältnisse offenbart eine Reihe von weiteren kleineren Effekten, die es erschweren, aus den gemessenen Spulenspannungen mathematisch auf die Position des Lichtbogens zu schließen, auf die aber an dieser Stelle nicht genauer eingegangen werden kann. Abschließend soll jedoch noch ein weiterer Effekt Erwähnung finden, der sich direkt aus der oben beschriebenen effektiven Spulenfläche ergibt. Es handelt sich hierbei um den Einfluss der Länge der Sensorspule auf die effektive Spulenfläche. Abbildung 5.13 zeigt schematisch einen Längsschnitt durch Sensorspule 1. Bisher wurde die effektive Spulenfläche in der

Mitte der Sensorspule betrachtet. Da die Spulenlänge aufgrund der kompakten Abmessungen der Vakuumröhre nicht vernachlässigt werden kann, verändert sich der effektive Spulenquerschnitt längs der Spule, und somit für jede Windung der Spule. Zusätzlich wird jedes Längenelement der Spule, welches eine eigene effektive Spulenfläche hat, von einem anderen Bereich der magnetischen Flussdichte durchsetzt. Dies ist in Abbildung 5.13 an der Feldlinie B_1 zu erkennen, welche die effektive Spulenfläche am unteren Rand durchdringt, jedoch nicht die beiden oberen effektiven Spulenquerschnitte.

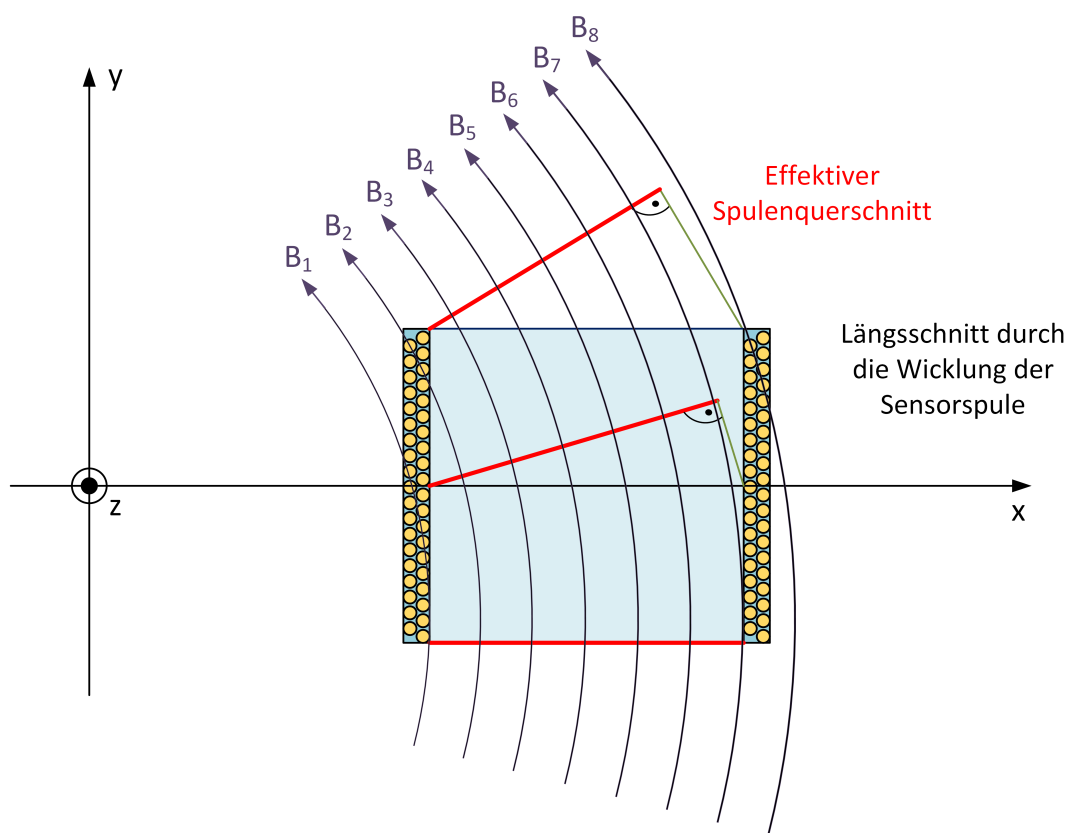


Abbildung 5.13.: Schematische Darstellung eines Längsschnitts durch eine der vier Sensorspulen. Rot eingetragen ist der effektive Spulendurchmesser jeweils an drei Positionen entlang der Längsachse der Sensorspule.

5.4.2. Elektromagnetische Beeinflussung (EMB)

Auf Grund der während eines Kurzschlussstromausschaltvorgangs unvermeidlichen hohen elektrischen- und magnetischen Wechselfelder ist in synthetischen Prüffeldern mit erhöhten EMB zu rechnen. Um diese Einflüsse auf dem Übertragungsweg zu minimieren, werden die gemessenen Spulenspannungen mittels vier analoger LWL-Übertragungssysteme in die Messkabine übertragen. Die Sendeeinheiten der Lichtwellenleiter sind in einem zusätzlichen metallischen Gehäuse untergebracht. Dennoch weisen die Spulenspannungen EMB-Effekte auf, die sich in zwei Komponenten einteilen lassen. So ist jede der vier Spulenspannungen mit einem Offset behaftet. Zusätzlich ist eine Drift zu identifizieren. In Abbildung 5.10 ist ein Vergleich einer gemessenen mit einer simulierten Spulenspannung dargestellt. Die simulierte Spulenspannung weist als Grundwelle eine ideale Cosinushalbwellen auf. Zu Beginn und zum Ende der Halbwellen sind die Abweichungen der realen Messung zur idealen Form erkennbar. Wie für EMB-Einflüsse üblich, sind die beiden erwähnten Störeinflüsse nicht konstant, sondern variieren bei jeder Messung in Form und Ausprägung, was eine nachträgliche Kompensation nahezu unmöglich macht.

5.4.3. Bandbreitenbegrenzung

Die Induktivitäten der Senserspulen bilden in Kombination mit den parasitären Kapazitäten der angeschlossenen elektrischen Leitungen und den Eingangskapazitäten der LWL-Sender einen Tiefpass. Als Resultat lassen sich in den gemessenen Spulenspannungen keine Signalanteile mit einer Frequenz oberhalb von 20 kHz erkennen. Dieses Tiefpassverhalten ist in Abbildung 5.10 zu Beginn des Ausschaltprozesses und am Ende zu erkennen. Die sinusförmige Stromhalbschwingung induziert eine negative Cosinushalbwellen in die Senserspulen. Zu Beginn und zum Ende dieses Signals entstehen so Signalflanken, die einer Sprunganregung ähneln. Das Messsystem kann dieser Anregung aufgrund seiner begrenzten Bandbreite und dem daraus resultierenden Tiefpassverhalten nicht exakt folgen. Die Folge ist eine Abflachung der Signalflanken, wie sie in den Abbildungen 5.4, 5.9 und 5.10 zu erkennen ist.

5.5. Analyse und Nutzen des Messsystems

Dem Induktionsgesetz folgend entsteht die Spulenspannung durch die Bildung des totalen Differentials, wie in Gleichung 5.8 dargestellt. Um die Position des Lichtbogens aus den Spulenspannungen zu berechnen, ist es nötig, das totale Differential umzukehren. Dies führt zu einem Satz von vier Differentialgleichungen. Um lösbar Differentialgleichungen zu erhalten, war es notwendig, eine Reihe von Vereinfachungen zu treffen, wie sie in Abschnitt 5.3 beschrieben werden. Die Verwendung von real gemessenen Spulenspannungen zur Positionsbestimmung mittels der aufgestellten Differentialgleichungen führt jedoch zu Instabilitäten und bedingt so das vorzeitige Abbrechen der eingesetzten Solver. Eine Möglichkeit, diese Instabilitäten zu vermeiden, wäre eine Verfeinerung des mathematischen Modells. Dies würde jedoch zu einem System aus Differentialgleichungen führen, welches nicht eindeutig oder sogar überhaupt nicht lösbar wäre. Alternativ bietet sich eine Methode an, die auf sogenannte „Look-Up-Tabellen“ zurückgreift. In diesen Look-Up-Tabellen würde zuvor aus allen möglichen Lichtbogenpositionen ein Satz von dazugehörigen Sensorsignalen berechnet und hinterlegt. In einem nächsten Schritt werden zu jedem Messpunkt die gemessenen Sensorsignale mit den berechneten Werten aus den Look-Up-Tabellen verglichen und die dazu gehörige Lichtbogenposition ausgelesen. Durch den Einsatz von Spulen als Sensoren und die damit verbundene Bildung des totalen Differentials ist die Zuordnung von induzierter Spannung und Lichtbogenposition jedoch nicht mehr eindeutig. Daher ist die Verwendung von Look-Up-Tabellen an dieser Stelle nicht zielführend.

Gemäß Kapitel 4 würde die Kenntnis über den zeitlichen Verlauf des magnetischen Flusses, der die Sensorspulen durchdringt, zu einem intuitiver interpretierbaren Messergebnis führen. Um den magnetischen Fluss aus den Spulenspannungen zu berechnen, müssen diese über die Messdauer integriert werden. Wie in Abschnitt 5.4 beschrieben wurde, sind die aufgezeichneten Spulenspannungen mit einer Reihe von Fehlereinflüssen behaftet. Einige dieser Einflüsse wirken nicht auf den magnetischen Fluss in der Spule, sondern auf die bereits induzierte Spulenspannung, noch bevor diese endgültig aufgezeichnet und abgespeichert werden kann. Die Integration der Spulenspannung führt zu einem Aufaddieren aller Fehlereinflüsse und verfremdet das Ergebnis über die Zeitachse zunehmend. Die resultierenden Abweichungen des so berechneten magnetischen Flusses zum tatsächlichen magnetischen Fluss sind so erheblich, dass kein Vorteil für eine weitere Auswertung entsteht.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen der mathematischen Nachbildung zeigt, dass die höherfrequenten Oberschwingungen auf der 50-Hz-Cosinusgrundwelle ihre Ursache in der Bewegung des Lichtbogens haben. Auch ohne weitere mathematische Nachbehandlung ist es möglich, mit diesem System die Bewegung des kontrahierten Schaltlichtbogens im Inneren von kommerziellen Vakuumschaltröhren zu detektieren. Anhand der Anzahl der Spannungsmaxima der aufgezeichneten Spulenspannungen sowie der Frequenz der Oberschwingungen lässt sich auch eine qualitative Aussage über die Intensität der Lichtbogenbewegung treffen. Eine konkrete Geschwindigkeit des Lichtbogens, wie es bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen möglich ist, lässt sich jedoch nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmen. Ebenfalls lassen sich keine Aussagen über weitere Lichtbogencharakteristika, wie Kontraktionszeitpunkt oder Lichtbogenmodus treffen. Der Nutzen des Messsystems ist damit gegenüber der Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera erheblich eingeschränkt. Jedoch stellt die Möglichkeit, die Lichtbogenbewegung an kommerziellen Vakuumschaltröhren zu detektieren, eine Perspektive dar, die Korrelation von Ausschaltversagern und Lichtbogenbewegung qualitativ zu untersuchen.

Es bleibt gegenüber den Videoverfahren der Vorteil, dass Original-Röhren eingesetzt werden können, so dass Effekte der Dampfschirme oder des kleinen Volumens untersucht werden können. Für eine weiterführende, qualitative und wesentlich genauere Auswertung muss jedoch das Spulen basierte Messprinzip verlassen werden. Als Alternative bieten sich Hall-Sensoren an, denen sich das nächste Kapitel widmet. Dennoch bietet sich das Spulen basierte Messsystem zur Detektion des Lebensdauerendes von RMF-Kontaktsystemen, welches unter anderem durch ausbleibende Lichtbogenbewegung aufgrund von erodierten Kontaktgeometrien gekennzeichnet ist, an. Der robuste Aufbau sowie die einfache Möglichkeit, qualitativ anhand von zeitlich versetzten Spannungsmaxima in den vier Spulenspannungen einen stehenden Lichtbogen von einem sich bewegenden zu unterscheiden, stellt den Hauptnutzwert des Messsystems dar. Die praktischen Untersuchungen an kommerziellen Vakuumschaltröhren mit dem Spulen basierten Messsystem sowie die damit gewonnenen Ergebnisse werden in Kapitel 8 beschrieben.

6. Detektion der Lichtbogenbewegung mittels Hall-Sensoren

Wie in Kapitel 5 beschrieben wurde, unterliegt ein spulen-basiertes Messsystem der Einschränkung, nur die zeitliche Veränderung des magnetischen Flusses in den Senserspulen detektieren zu können. Zusätzlich ist es nicht möglich, diese Veränderung einer exakten Lichtbogenbewegung zuzuordnen. Daher ist es von Interesse, die magnetische Flussdichte an den Sensorpositionen direkt messen zu können, ohne den Umweg über das Induktionsgesetz in Kauf nehmen zu müssen. Eine Möglichkeit dazu ist der Einsatz von Hall-Sensoren. Im direkten Vergleich mit Senserspulen, wie sie in Kapitel 5 beschrieben wurden, bieten Hall-Sensoren eine Reihe von Vorteilen, die besonders in der räumlich beengten Messumgebung im Außenbereich einer kommerziellen Vakuumschaltröhre zum Tragen kommen. So messen Hall-Sensoren die magnetische Flussdichte in nur einem Punkt mit einer sehr starken Richtungsabhängigkeit in Richtung der Sensorflächennormalen. Auf diese Weise sind die in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Einflussfaktoren für Hall-Sensoren ohne Bedeutung. Zudem weisen Hall-Sensoren eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Vibrationen und Erschütterungen auf, wie sie auch ohne Strom durch jede Schalthandlung auftreten. In diesem Kapitel wird der Aufbau eines Messsystems beschrieben, welches sich dieser Sensortechnologie bedient. Des Weiteren werden die wesentlichen Messsystem spezifischen Fehlereinflüsse beschrieben und diskutiert, die zur korrekten Interpretation der Messergebnisse berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus wird ein Verfahren vorgestellt, welches ermöglichen soll, aus den gemessenen Sensorsignalen mit Hilfe von Look-Up-Tabellen die ursprüngliche Lichtbogenposition zu berechnen.

6.1. Aufbau des Messsystems

Acht Hall-Sensoren¹ sind an der Außenseite einer kommerziellen Vakuumröhre auf der Höhe des Kontaktsystems positioniert. Die Anordnung der Hall-Sensoren ist in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt.

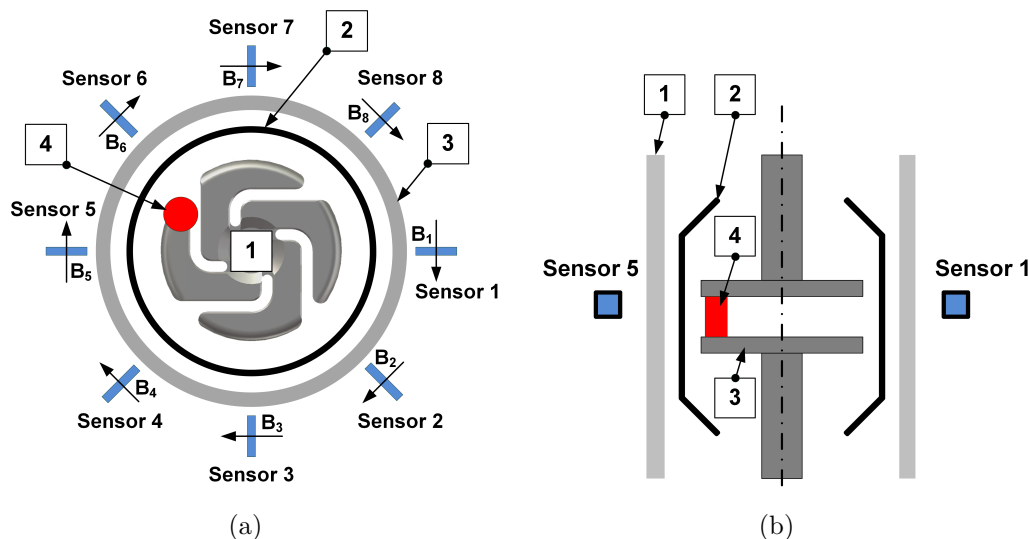


Abbildung 6.1.: a) Idealisierte Draufsicht auf den Querschnitt einer Vakuumschaltröhre. Schematische Darstellung der vier Sensorspulen entlang der Außenseite des Keramikgehäuses 1) Spiralarmkontakt 2) Metaldampfschild 3) Keramikgehäuse 4) Schaltlichtbogen
b) Idealisierte Seitenansicht auf den Querschnitt einer Vakuumschaltröhre 1) Keramikgehäuse 2) Metaldampfschild 3) Spiralarmkontaktscheiben 4) Schaltlichtbogen

Bei dem hier beschriebenen Messsystem kommen Hall-Sensoren vom Typ He144 der Firma „Hoeben Electronics“ zum Einsatz. Dabei handelt es sich um reine „Hall-Plate-Sensors“. Diese Sensoren bestehen lediglich aus einer sehr dünnen Scheibe aus Halbleitermaterial. Sie besitzen keine interne Verstärkerelektronik. Aus diesem Grunde weisen sie eine hohe Bandbreite, eine geringe Empfindlichkeit gegenüber EMB und einen besonders großen Messbereich bei gleichzeitiger hoher Empfindlichkeit auf. Wie in Abschnitt 5.3 beschrieben und in Abbildung 5.6 dargestellt, befindet sich die Information der Lichtbogenposition in einem höherfrequentem Signal kleiner Amplitude. Dieses ist der 50-Hz-Sinushalbwellen, die durch den Hochstrom hervorgerufen wird, aufmoduliert. Daher ist es notwendig, im Bereich hoher magnetischer

¹Auf die Wahl der Anzahl der Sensoren wird in Abschnitt 6.5 genauer eingegangen.

Flussdichten von einigen 100 mT mit hoher Auflösung messen zu können. Folglich ist speziell die Kombination des großen Messbereichs bei gleichzeitiger hoher Empfindlichkeit für den Einsatz zur Messung von Lichtbogenbewegungen unverzichtbar. Die einzelnen Hall-Sensoren sind mit einer vierpoligen M8-Sensorbuchse verlötet und an einer exakten Position in einem PVC-Röhrchen mit Epoxydharz vergossen.

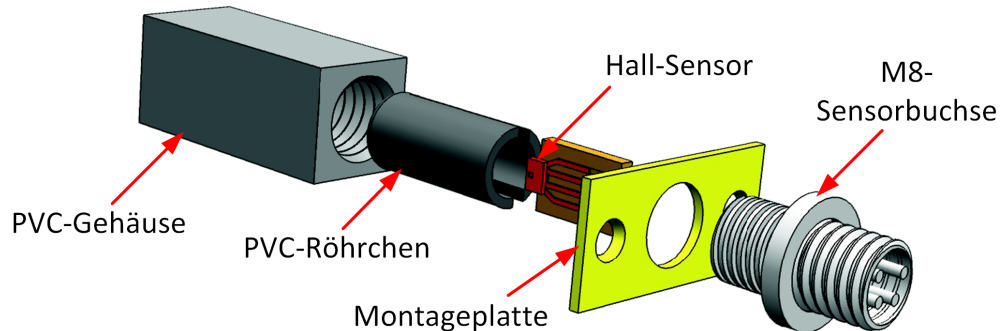


Abbildung 6.2.: CAD-Explosionsdarstellung eines Hall-Sensor-Moduls

Das so entstandene Sensormodul ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Zur weiteren exakten Positionierung werden die Sensormodule jeweils in einem rechteckigen PVC-Gehäuse verschraubt. Die so entstandenen, acht fertigen Sensormodule werden in einen achteckigen Haltering geschoben und verschraubt. Dieser Haltering gewährleistet, dass die einzelnen Sensoren stets die selbe Position zueinander besitzen. Alle Hall-Sensoren befinden sich somit auf einer kreisförmigen Orbitalen mit einem Radius von 40,5 mm. Die Sensoren haben einen Winkelabstand zueinander von 45° und sind so ausgerichtet, dass ihre Sensornormale in azimuthale Richtung weist. Auf Grund der ausgeprägten richtungsabhängigen Empfindlichkeit der Sensoren ist eine möglichst präzise Ausrichtung von größter Bedeutung für ein akkurates Messergebnis.

Um eine Montage des Sensorhalterings auf eine Vielzahl von verschiedenen Typen von Vakuumröhren zu ermöglichen, wird für jeden Röhrentyp ein Adapter benötigt, der gleichzeitig die elektrische Isolation zwischen Sensormodulen und Dampfschirm erhöhen soll. Der Adapter wird jedem Röhrentyp derart angepasst, dass er den Sensorhaltering auf dem Niveau des Kontaktsystems fixiert. Abbildung 6.3 zeigt eine CAD-Darstellung des auf eine kommerzielle Vakuumröhre installierten Sensorhalterings, zusammen mit dem Isolationsadapter. Abbildung 6.4 zeigt das fertig in ein kommerzielles Schaltgerät eingebaute Messsystem.

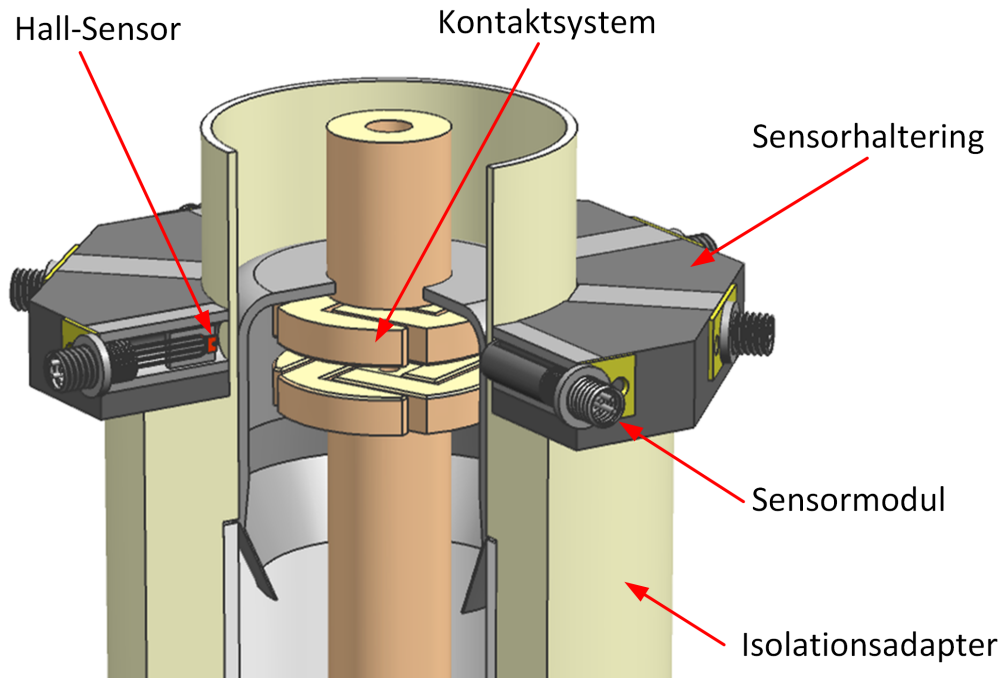


Abbildung 6.3.: CAD-Darstellung des auf einer Vakuumröhre montierten Sensorhalterings, ausgestattet mit allen acht Hall-Sensormodulen. Zu erkennen ist der für diesen Röhrentyp zum Einsatz kommende Isolationsadapter, sowie die exakte Position des Hall-Sensors in einem Sensormodul [Elb 2013].

Die verwendeten Hall-Sensoren vom Typ HE144 benötigen eine Konstantstromversorgung. Ihre Ausgangsspannung U_{hall} berechnet sich gemäß Gleichung 6.1.

$$U_{\text{hall}} = K_{\text{hall}} \cdot I_{\text{supply}} \cdot B + U_{\text{offset,hall}} \quad (6.1)$$

Es ist zu erkennen, dass die Ausgangsspannung direkt proportional zu dem Versorgungsstrom I_{supply} des Hall-Sensors ist. Daher ist die Qualität der Konstantstromquelle von gesteigerter Bedeutung. Das hier beschriebene System wird mit acht separat aufgebauten Stromreglern betrieben, die aus einem Akkumulator gespeist werden. Bei früheren Aufbauten hatte sich gezeigt, dass netzbetriebene Varianten störanfälliger gegenüber hochfrequenten Störungen sind, wie sie beispielsweise durch Schaltnetzteile verursacht werden. Ebenfalls erreicht man auf diese Weise eine weitgehende Entkoppelung von Störeinflüssen, die sich im Labornetz während eines Ausschaltversuchs ausbreiten. Auf die individuellen Sensorempfindlichkeiten K_n wird in Kapitel 6.3 genauer eingegangen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass es sich hier-

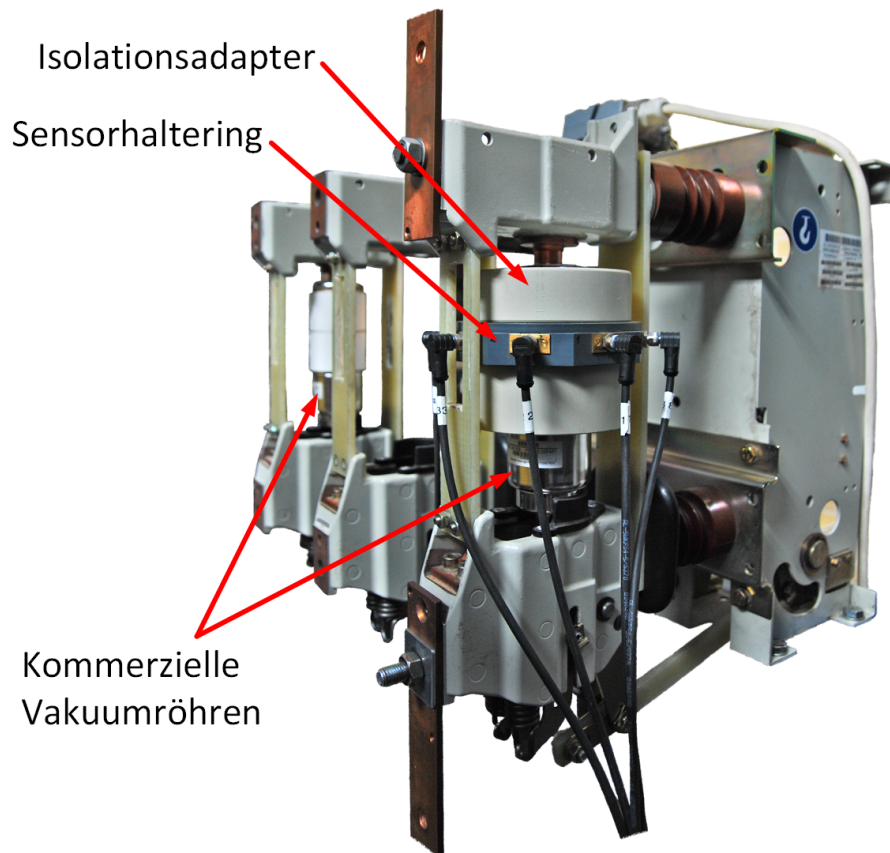


Abbildung 6.4.: Messsystem eingebaut in ein kommerzielles Mittelspannungsschaltgerät der Marke SIEMENS.

bei um Konstanten handelt, die somit keinen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Sensorsignale haben.

Die gemessenen Hall-Spannungen werden, nicht wie bei dem im Kapitel 5 beschriebenen Messsystem mit Lichtwellenleitern in die Messkabine übertragen, sondern direkt im Prüffeld von einem Messrechner aufgezeichnet. Der Messrechner ist mit einer Messkarte vom Typ NI PCI-6123 ausgestattet. Hierbei handelt es sich um eine Messkarte mit 8 analogen Eingangskanälen, die simultan mit 500 kHz abgetastet werden. Der Messrechner ist galvanisch getrennt über Wireless LAN mit dem Hauptrechner in der Messkabine verbunden und wird von diesem vor jeder Ausschaltprüfung aktiviert. Der Messrechner erkennt den Strombeginn anhand einer charakteristischen Störung in den Hall-Signalen und nutzt dieses Signal für den Analogtrigger der Messkarte. Die Ursache des charakteristischen Anfangsimpulses liegt vermutlich in der geometrisch großen Hauptinduktivität des synthetischen Prüfkreises. Sie besitzt

eine verhältnismäßig große Längskapazität. Schaltet der Draufscharer ein, fließt für kurze Zeit der Strom durch diesen kapazitiven Parallelzweig der Hauptinduktivität und lädt die parasitäre Längskapazität auf. Ein solcher Störimpuls ist von sehr kurzer Dauer und weist eine sehr hohe Stromsteilheit auf.

Der Messrechner misst 1000 Samples vor dem Triggersignal und 6000 Samples danach. Dies entspricht einer Messdauer von 14 ms. Die Daten werden zunächst lokal in einer Datei abgespeichert. Nach Abklingen aller elektromagnetischen Störungen, die durch den Ausschaltversuch verursacht werden, wird diese Messdatendatei mittels Wireless LAN an den Hauptrechner in der Messkabine übertragen. Abbildung 6.5 zeigt eine schematische Darstellung der beschriebenen Messkette.

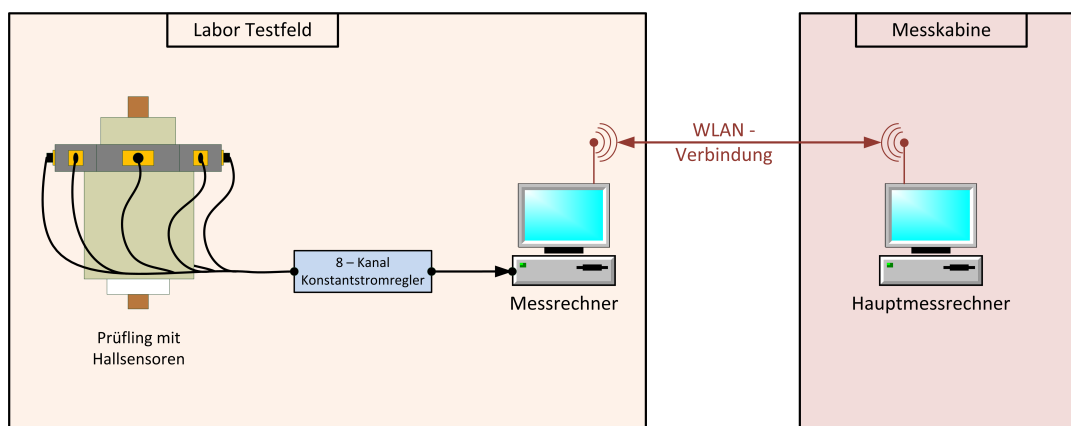


Abbildung 6.5.: Schematische Darstellung des gesamten Messsystems

In Abbildung 6.6 sind die gemessenen Hall-Spannungen eines Ausschaltvorgangs dargestellt. Der ausgeschaltete Strom hatte eine Höhe von 25 kA Effektivwert bei einer Lichtbogendauer von 9,2 ms. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur die zwei Signale der sich gegenüberliegenden Sensoren 1 und 5 dargestellt. Ebenfalls wurde der bereits erwähnte Offset $U_{\text{offset,hall}}$ von den Signalen abgezogen. Ein Vergleich mit Abbildung 5.6 lässt eine starke Ähnlichkeit erkennen. Es ist eindeutig der Einfluss der 50-Hz-Sinushalbwelle des ausgeschalteten Stromes zu sehen. Zusätzlich enthalten die Sensorspannungen ein höherfrequentes Signal, welches, wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, die Informationen der Lichtbogenbewegung beinhaltet.

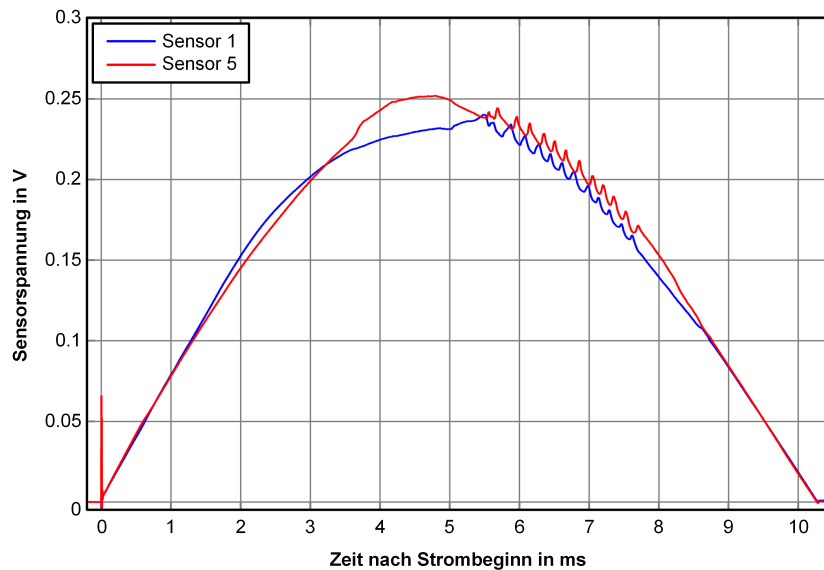


Abbildung 6.6.: Während eines Ausschaltprozesses gemessene Sensorspannungen von zwei sich gegenüber liegenden Sensoren. Stromhöhe 25 kA eff. bei einer Lichtbogenzeit von 9,3 ms.

Die Kontakttrennung findet 0,7 ms nach Strombeginn statt. Ab etwa 1,5 ms nach Strombeginn ist ein leichtes Auseinanderlaufen der beiden Sensorsignale zu erkennen. 3,5 ms nach Strombeginn ist verstärkt im Signal des Sensors 5 eine positive Abweichung von der sinusförmigen Grundwelle zu erkennen. Ab diesem Moment, bis etwa 5 ms nach Strombeginn, bewegt sich der Lichtbogen langsam an Sensor 5 vorbei und dementsprechend im Sensor fernen Bereich von Sensor 1. Folglich erfährt in diesem Zeitraum das Signal von Sensor 1 eine negative Abweichung von der sinusförmigen Grundwelle. 5 ms nach Strombeginn beschleunigt der Lichtbogen abrupt und vollzieht 11 sehr schnelle Umläufe auf der Kontaktoberfläche. Bemerkenswert ist der sehr schnelle Anlauf des Lichtbogens sowie die hohe Frequenz der hier beobachteten Umläufe. Ebenfalls zu erkennen ist eine unregelmäßige Bewegung des Lichtbogens 5,5 ms nach Strombeginn. 7,7 ms nach Strombeginn beendet der Lichtbogen seine hochfrequente Bewegung. In späteren Kapiteln wird auf die Bewegungscharakteristik des Lichtbogens noch ausführlich eingegangen. Bereits die in Abbildung 6.6 dargestellten, unbehandelten Sensorspannungen weisen eine einfache und intuitive Interpretierbarkeit auf. Es lassen sich, im Gegensatz zu dem in Kapitel 5 beschriebenen spulenbasierten Messsystem, auch verhältnismäßig langsame Lichtbogenbewegungen erfassen. Mit diesem System ist es somit möglich, Übergän-

ge von verschiedenen Lichtbogenbewegungszuständen zu untersuchen.

6.2. Aufbauspezifische Fehlereinflüsse

In diesem Abschnitt werden die Fehlereinflüsse aufgezählt und beschrieben, die durch die einzelnen Komponenten des Messsystems verursacht werden. Im Gegensatz zu dem in Kapitel 5 beschriebenen Spulen basierten Messsystem detektieren die hier verwendeten Hall-Sensoren die magnetische Flussdichte direkt, ohne Umweg über das Induktionsgesetz und die damit verbundene induzierte Spulenspannung. Zusätzlich weisen die Sensoren, wie bereits erwähnt, eine hohe richtungsabhängige Empfindlichkeit in Richtung der Sensorflächennormalen auf. Diese beiden Punkte führen dazu, dass geometrisch bedingte Fehlerfaktoren, wie sie in Kapitel 5 beschrieben werden, nicht auftreten. Daher werden in diesem Abschnitt die möglichen Fehlerquellen der einzelnen Module der Messkette betrachtet.

6.2.1. Sensormodul

1. Temperatureinflüsse

Der hier zum Einsatz kommende Hall-Sensor ist vom Typ HE144. Die Ausgangsspannung von Hall-Sensoren weist zwei Komponenten auf. Eine Offsetspannung und eine Spannung, die abhängig vom zu messenden magnetischen Fluss ist. Zu Beginn einer jeden Messdatenauswertung werden die gemessenen Signale von ihren Offsetanteilen individuell befreit. Daher spielt diese Komponente keine weitere Rolle. Nur die vom Fluss abhängige Komponente unterliegt einer Temperaturabhängigkeit [Ele 2011a]. Der Einfluss der Temperatur auf diese Komponente entspricht einer Veränderung der Sensorempfindlichkeit und wird vom Hersteller mit dem Koeffizienten $\alpha_v = 0,02 \text{ \%}/\text{K}$ angegeben [Ele 2011b]. Dies führt bei einem maximalen Temperaturbereich im Labor von 10°C bis 30°C zu einer Veränderung der Sensorausgangsspannung von $0,4 \text{ \%}$.

2. Planarer Hall-Effekt

Unter dem planaren Hall-Effekt versteht man eine Veränderung des elektrischen Widerstandes der Halbleiterscheibe des Sensors, die sich einstellt, wenn der Sensor einem magnetischen Feld ausgesetzt wird, welches orthogonal zur

Sensorflächennormalen verläuft. Da der Sensor von einem Stromregler mit einem konstanten Strom versorgt wird, der durch die Halbleiterscheibe fließt, führt eine Veränderung des Widerstandes zu einer Veränderung der Ausgangsspannung des Sensors. Das bedeutet eine Beeinflussung des Messergebnisses durch Feldkomponenten, die quer zu jenen Feldkomponenten stehen, die von Interesse sind. Daraus folgt eine Beeinflussung der richtungsabhängigen Empfindlichkeit des Sensors. Laut Herstellerangaben verursacht der Effekt einen sehr kleinen Fehler, ohne diesen weiter zu beziffern [Ele 2011b]. Messtechnische Überprüfungen der verwendeten Sensormodule zeigten ebenfalls keine messbare Beeinflussung der richtungsabhängigen Empfindlichkeit.

3. Nichtlinearität der Sensormodule

Eine mit Permanentmagneten durchgeführte messtechnische Überprüfung der Nichtlinearität der Sensormodule ergab einen maximalen Fehler von $\pm 1,2\%$. Der dabei abgedeckte Bereich der magnetischen Flussdichte im Sensorpunkt reichte bis über 1 T und deckte somit den Einsatzbereich des Messsystems vollständig ab.

6.2.2. Stromregler

Gemäß Gleichung 6.1 ist die Sensorempfindlichkeit direkt proportional zur Höhe des Versorgungsstromes I_{supply} . Daher ist die Stabilität der Konstantstromquelle von großer Bedeutung. Messungen der Sensorstromversorgung während eines Ausschaltversuchs haben ergeben, dass der Versorgungsstrom während eines solchen Versuchs um etwa 0,1 % variiert.

1. **Temperatureinflüsse** Der verwendete Stromregler stellt seinen Ausgangsstrom gemäß der ihm übergebenen Referenzspannung ein. Damit lassen sich der vorgeschaltete Spannungsregler und der eigentliche Stromregler als eine Einheit betrachten. Laut Datenblättern der beiden Bauelemente führt eine Schwankung von $\pm 20^\circ\text{C}$ um den Arbeitspunkt von 25°C zu einer maximalen Veränderung des Versorgungsstromes I_{supply} von $\pm 0,16\%$.

2. **Einfluss der Reglercharakteristik** Die Aufgabe des Stromreglers ist es, seinen Innenwiderstand der sich verändernden Last so anzupassen, dass sich stets ein konstanter Strom einstellt. Die Reglercharakteristik stellt das Verhalten des Reglers dar, wie er auf eine Lastveränderung reagiert. Diese kann sich je nach Bauart und Einsatzzweck stark unterscheiden. Der hier angestrebte Einsatzzweck stellt einen Sonderfall dar, da der Augenblick des Strombeginns mit erheblichen elektromagnetischen Störungen verschiedenster Art verbunden ist. Dies verursacht auf der Lastseite des Reglers eine hoch variable Last, die der Regler mit ausreichender Dynamik, jedoch ohne überzuschwingen, kompensieren muss. Während mehrerer Ausschaltversuche zeigten Messungen des Versorgungsstromes, dass der Versorgungsstrom während einer Messung um weniger als 0,1 % variiert, unabhängig von der gemessenen Lichtbogenbewegungscharakteristik.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die einzelnen Komponenten des Messsystems einen verhältnismäßig geringen Fehler produzieren, der bei einigen Komponenten sogar im Promillebereich liegt. Einen wesentlich größeren Einfluss auf die Qualität des Messergebnisses weisen die Faktoren auf, welche durch das Messprinzip selbst bedingt sind. Diese werden ausführlich in Kapitel 7 beschrieben.

6.3. Aufbereitung und Interpretation der Messergebnisse

Bereits die in Abbildung 6.6 dargestellten Sensorsignale von zwei der acht Sensoren lassen eine Reihe an Informationen über die Lichtbogenbewegung erkennen. Dennoch beinhalten die Sensorsignale einige Komponenten, die nicht durch die Lichtbogenbewegung verursacht sind und somit der Identifikation der Bewegungscharakteristik im Wege stehen.

Die an den Hall-Sensoren zu messende Spannung lässt sich gemäß Gleichung 6.1 beschreiben. $U_{\text{offset, hall}}$ entspricht einer Gleichspannung und kann für jeden der acht Sensoren messtechnisch ermittelt werden. Diese Offsetspannung ist während der gesamten Messung konstant und lässt sich somit direkt von den eigentlichen Messergebnissen durch Subtraktion entfernen.

Die individuellen Sensorempfindlichkeiten K_n der einzelnen Sensoren wurden experimentell ermittelt und liegen bei einer Stromversorgung von 8 mA im Bereich von $K_n = 160$ bis 170. Da diese Werte während des Ausschaltvorgangs konstant sind, können die gemessenen Sensorsignale durch die individuellen Sensorempfindlichkeiten ohne weitere Berücksichtigung einer zeitlichen Abhängigkeit dividiert werden. Die in Abbildung 6.6 dargestellten Signale weisen eine dominante Grundwelle auf, die durch den zeitlichen Verlauf des Stromes verursacht wird. Aufgrund der direkten Proportionalität zwischen dem Feld verursachenden Strom und der magnetischen Flussdichte gemäß Gleichung 4.1 weist diese Grundwelle wie der Strom die Form einer Sinushalbwellen auf. Durch Division der gemessenen Sensorsignale mit dem parallel dazu gemessenen Strom wird diese Grundwelle eliminiert. Die so erlangten Signale werden im Folgenden als „bezogene Flussdichte“, bezeichnet und haben die Einheit T/A. Ein weiterer Vorteil der so betrachteten bezogenen Flussdichten ist, dass ihr zeitlicher Verlauf ausschließlich durch die Lage der Strompfade relativ zu den einzelnen Sensormodulen beeinflusst wird.

Die Hochstromzuführung und die Rückführung zum Prüfling im Labor bilden eine Schleife mit mehreren Quadratmetern Querschnittsfläche. Die verbauten Kupferflachprofile weisen zudem einen geometrisch großen Querschnitt auf. Die Folge ist ein unvermeidlicher Stromverdrängungseffekt, der die Stromdichte in den Leitern, abhängig von der Stromhöhe, verschiebt. Die durch diese Strompfade entstehende Feldverteilung der magnetischen Flussdichte führt zu einer Beeinflussung der Messergebnisse. Aus diesem Grunde werden Referenzmessungen durchgeführt, bei denen keine Kontaktöffnung stattfindet. Es muss während dessen darauf geachtet werden, dass alle weiteren Parameter wie Stromhöhe, Einbauposition des Schaltgerätes im Labor sowie der verwendete Pol im Schaltgerät möglichst exakt den Vorgaben der angestrebten Prüfung entsprechen. Die so aufgezeichneten Sensorsignale beinhalten alle Einflüsse der starren Strompfade. Die gewonnenen Daten der Referenzmessung erfahren ebenfalls eine Offsetkorrektur, eine Berücksichtigung der individuellen Sensorempfindlichkeit und eine Bildung der bezogenen Flussdichten. Anschließend werden diese Daten von den bezogenen Flussdichten des zu untersuchenden Ausschaltprozesses subtrahiert. Das Ergebnis sind die bezogenen Flussdichten der acht Hall-Sensoren, die ausschließlich die Positionsinformationen des Strompfades durch die Kontaktscheiben und des Lichtbogens beinhalten.

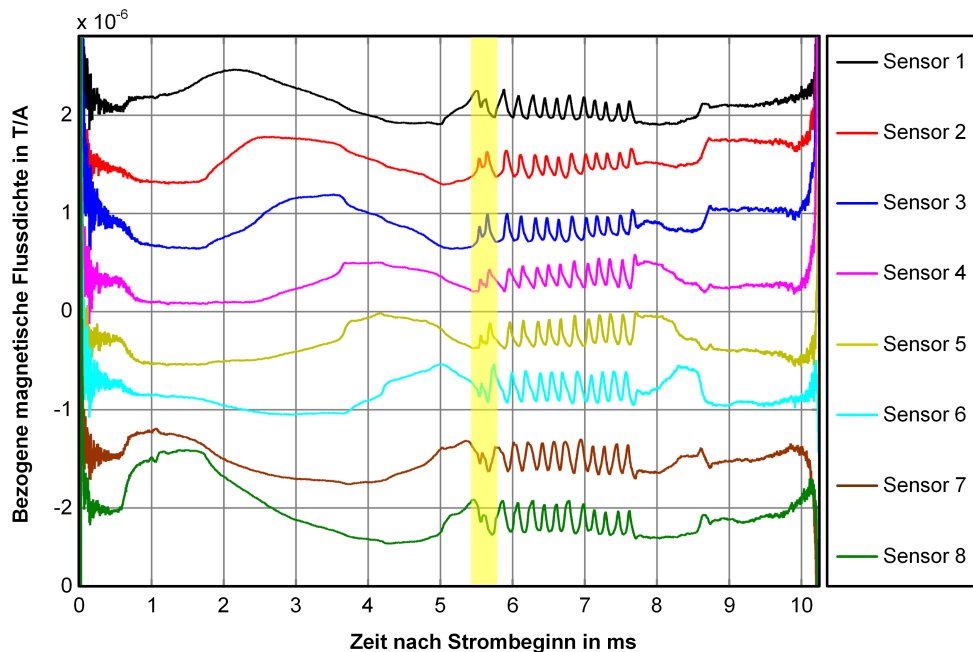


Abbildung 6.7.: Aufbereitete gemessene Sensorsignale von allen acht Sensoren, die während eines Ausschaltprozesses von 25 kA eff. bei einer Lichtbogenzeit von 9,3 ms aufgezeichnet wurden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Signale untereinander angeordnet. Gelb hinterlegt ist der Zeitraum während dem zwei getrennte Lichtbogensäulen erkannt werden können.

Abbildung 6.7 zeigt die vollständigen Messergebnisse aus Abbildung 6.6, in der nur zwei Sensorsignale dargestellt sind, die auf die oben beschriebene Weise behandelt wurden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die acht Signale untereinander angeordnet. Die durch die Lichtbogenbewegung verursachten Schwingungen sind deutlich zu erkennen und können mit der Grundlinie des entsprechenden Signals verglichen werden. Es lässt sich erkennen, dass sich der Lichtbogen nach der Kontakttrennung in dem Bereich vor Sensor 7 und Sensor 8 etabliert. 1,5 ms nach Strombeginn beginnt der Lichtbogen sich Sensor 1 zu nähern um eine langsame Runde vorbei an Sensor 2 und Sensor 3 zu beginnen. 3,7 ms nach Strombeginn ist in den Signalen von Sensor 3, 4 und 5 eine kurze, abrupte Bewegung des Lichtbogens weg von Sensor 3 und hin zu Sensor 4 und 5 zu erkennen. Durch eine anschließende Öffnung der Röhre ist die Lage der Sensoren relativ zur Kontaktgeometrie bekannt. Ein Vergleich mit Abbildung 6.1, welche einen Überblick über die Sensorpositionen in Bezug zur Spiralkontaktgeometrie gibt, zeigt, dass sich an dieser Stelle ein Spiralarmspalt befunden haben könnte. Die Überquerung dieses Spalts kann eine Erklärung einer ungleich-

mäßigen Bewegung sein. 5,4 ms nach Strombeginn befindet sich der Lichtbogen im Bereich zwischen Sensor 8 und Sensor 1. Dort beschleunigt er abrupt und beginnt, wie bereits beschrieben, 11 schnelle Umdrehungen auf der Kontaktoberfläche. 5,5 ms nach Strombeginn lässt ein zusätzlicher Peak, der in allen Signalen leicht zeitversetzt auftaucht, auf die Erscheinung eines zweiten unabhängigen Strompfades schließen. Dies kann als eine Aufspaltung des Lichtbogens in zwei kontrahierte Lichtbogensäulen interpretiert werden. 7,7 ms nach Strombeginn beendet der Lichtbogen dicht vor der Position von Sensor 5 seine schnelle Bewegung abrupt. Ab diesem Moment bewegt sich der Lichtbogen langsam vor Sensor 4. Nach 9 ms beginnen sich die Sensorsignale zu widersprechen, da kein eindeutiger Peak in einem der Signale mehr zu identifizieren ist. In Anbetracht der zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Stromhöhe von unter 10 kA ist es naheliegend, dass der Lichtbogen in den diffusen Zustand übergegangen ist und somit keinen gebündelten Strompfad mehr darstellt.

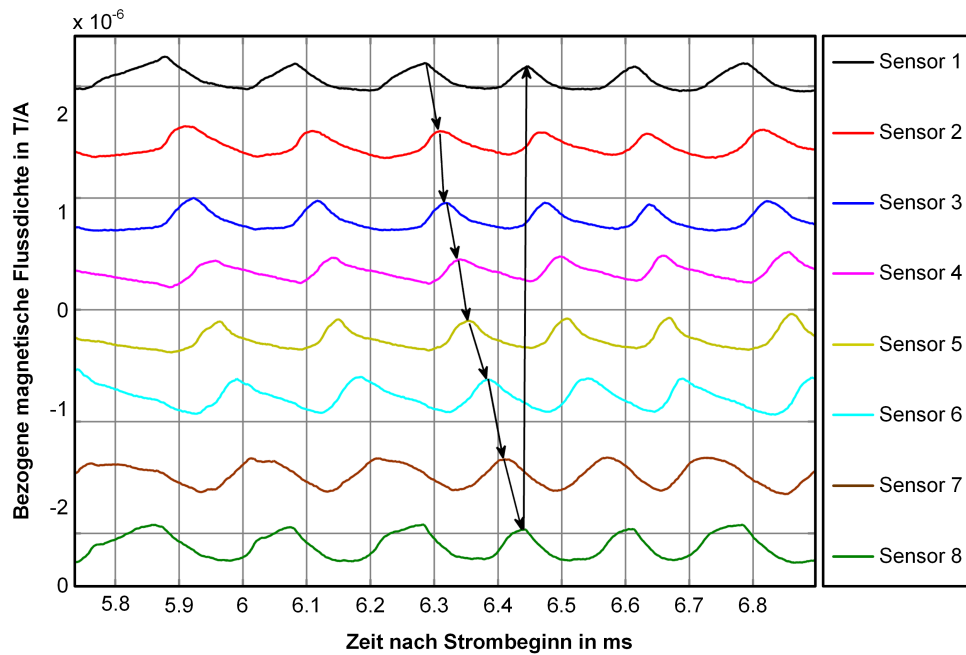


Abbildung 6.8.: Detaildarstellung der aufbereiteten gemessenen Sensorsignale aus Abbildung 6.7.

Abbildung 6.8 zeigt einen Ausschnitt der Signale aus Abbildung 6.7 mit einer höheren zeitlichen Auflösung. Es handelt sich dabei um den Ausschnitt während dessen der Lichtbogen die 11 Umdrehungen mit sehr hoher Frequenz vollführt. Es lässt sich erkennen, dass die Peaks der einzelnen Sensorsignale einen zeitlichen Versatz aufwei-

sen, die der räumlichen Anordnung der Sensoren um den Spiralkontakt entsprechen. Daher kann auch in dem Bereich der hohen Rotationsfrequenz von tatsächlichen Umläufen des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche gesprochen werden. In Abbildung 6.8 ist ein solcher Umlauf mit Pfeilen deutlich gemacht.

Die Sensorsignale weisen darüber hinaus eine auffällige Gleichmäßigkeit in ihrer Frequenz und ihrer Form auf. Dies lässt auf eine gleichmäßige Lichtbogenbewegung während der Phase der schnellen Bewegung schließen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Kontaktgeometrie einen wesentlichen Einfluss auf die Laufbahnen des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche ausübt. Daher beschreibt der Lichtbogen keine vorwiegend runden Bahnen, sondern weicht davon ab. Diese Eigenschaft erklärt die von Sensor zu Sensor unterschiedlichen Formen der Peaks, die sich in einem Sensorsignal von Peak zu Peak nur wenig verändern. Zusätzlich übt die Kontaktgeometrie selbst einen Einfluss auf das magnetische Außenfeld der Vakuumröhre aus, der in den Sensorsignalen ebenfalls wieder zu finden ist. Ein weiterer Faktor, der die unterschiedliche Form der Peaks von Sensorsignal zu Sensorsignal erklärt, ist die Gestalt des Lichtbogens, die von der eines zylinderförmigen Leiters abweicht. Es zeigt sich, dass die Betrachtung der bezogenen Flussdichten eine Reihe von Rückschlüssen auf die Bewegung des Schaltlichtbogens während des Ausschaltprozesses zulässt. Dabei zeigt der Lichtbogen Phasen der gleichmäßigen, schnellen Bewegung sowie Phasen, die durch eine langsame, teilweise ruckartige Bewegungscharakteristik geprägt sind. Diese Beobachtungen konnten ebenfalls an Einblickröhren vorgenommen werden und sind ausführlich in [Wol 2012; DSS 2003; GS 2005; Sch 1993] beschrieben. Dabei sind Lichtbogengeschwindigkeiten von bis zu 750 m/s beobachtet worden. Jedoch sind derart hohe Geschwindigkeiten ausschließlich an Spiralkontakten mit Durchmessern von mindestens 60 mm und Stromhöhen von mindestens 30 kA Effektivwert beobachtet worden. Beides sind Faktoren, die eine höhere Lichtbogengeschwindigkeit begünstigen. Anhand der hier betrachteten bezogenen Flussdichten lassen sich noch keine konkreten Aussagen über die tatsächliche Lichtbogengeschwindigkeit im Inneren einer kommerziellen Vakuumröhre treffen. Eine nähere Betrachtung der oben beschriebenen Phasen mit sehr hoher Geschwindigkeit lässt vermuten, dass der Lichtbogen im Inneren von kommerziellen Vakuumröhren ebenfalls in der Lage ist, derart hohe Geschwindigkeiten zu erreichen, auch wenn der Kontaktdurchmesser und der auszuschaltende Strom um ca. 30 % geringer waren als im Vergleich zu den erwähnten Untersuchungen an Einblickröhren.

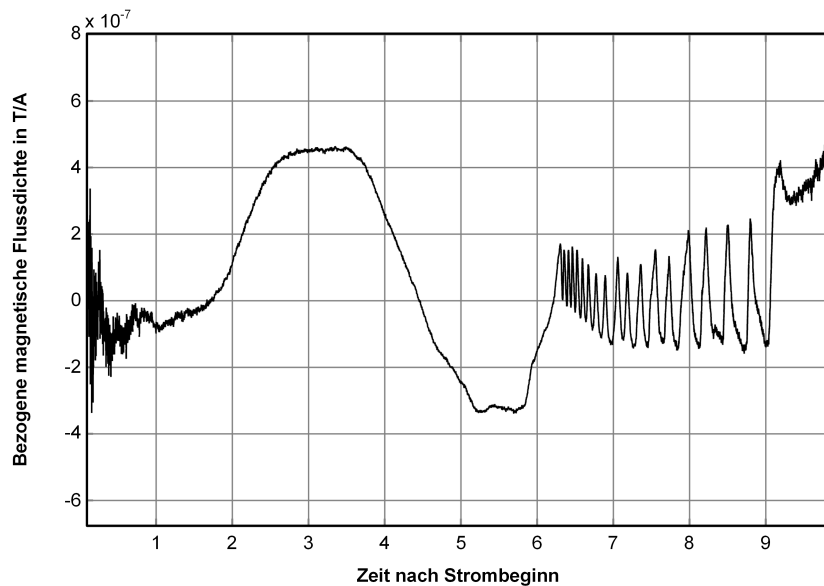


Abbildung 6.9.: Gemessener Verlauf der bezogenen magnetischen Flussdichte von Sensor 1 bei einem Ausschaltprozess von 25 kA mit einer Lichtbogenzeit von 9,4 ms.

Abbildung 6.9 zeigt den Verlauf der bezogenen Flussdichte von Sensor 1 während eines Ausschaltversuchs von 25 kA Effektivwert mit einer Lichtbogenzeit von 9,4 ms. Der Kontaktdurchmesser des verwendeten Spiralkontakts betrug 45 mm. Auch in diesem Verlauf ist die Anfangsphase mit geringer Lichtbogengeschwindigkeit zu erkennen, sowie die abrupte Beschleunigung des Lichtbogens. Die Phase der hohen Rotationsfrequenzen, die von 6,2 ms bis 9 ms nach Strombeginn dauert, weist Rotationsfrequenzen von 3 kHz bis über 15 kHz auf. Dies würde für einen geschätzten Laufbahnradius von 19 mm eine Lichtbogengeschwindigkeit von 179 m/s bis über 895 m/s bedeuten. Auch wenn der Einfluss der sehr viel kompakteren Abmessungen einer kommerziellen Vakuumröhre im Vergleich mit Einblickröhren und der Einfluss der Anwesenheit eines vollständigen Metaldampfschirmes einen positiven Effekt auf die Lichtbogengeschwindigkeit haben können, scheinen diese Werte auffällig hoch. Aus diesem Grunde ist es von gesteigertem Interesse, die genaue Position des Lichtbogens bestimmen zu können, um somit konkretere Rückschlüsse auf den tatsächlich zurück gelegten Weg ziehen zu können.

Ein weiterer Aspekt, der in Abbildung 6.9 erkennbar ist, ist die Frequenzabhängigkeit der Amplitude. Mit steigender Rotationsfrequenz nehmen die Amplituden der zu messenden Signale merklich ab. Dies lässt auf eine Dämpfung des magnetischen Außenfeldes der Vakuumröhre schließen, welche mutmaßlich durch in dem

Metалldampfschirm induzierte Wirbelströme verursacht wird. Das ist ein zusätzlicher Aspekt, der im Zuge der Rückrechnung auf die eigentliche Lichtbogenposition berücksichtigt werden muss. Daher wird in Abschnitt 7 auf durch die Lichtbogenbewegung induzierte Wirbelströme in den Metалldampfschirm und die Kontaktscheiben sowie die damit verbundene Dämpfung des magnetischen Außenfeldes der Vakuumröhre genauer eingegangen.

6.4. Mathematische Betrachtung

In diesem Abschnitt wird das Messsystem mathematisch nachgebildet. Das Ziel ist es, einen mathematischen Zusammenhang zwischen den gemessenen Sensorspannungen und der tatsächlichen Position des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche aufzustellen. Ähnlich wie in Kapitel 5.3 wird der betrachtete Strompfad aus mehreren infinitesimal dünnen Stromfäden, die sich im Vakuum befinden, zusammengesetzt, so dass zur Nachbildung der einzelnen Abschnitte des Strompfades das Gesetz von Biot-Savart in folgender Form herangezogen werden kann.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \int_C \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad (6.2)$$

Im Folgenden wird die magnetische Flussdichte in einem beliebigen Sensor n abhängig von der Lichtbogenposition und dem Kontakthub ermittelt. Die gesamte magnetische Flussdichte setzt sich aus der Überlagerung aller Flussdichten der Einzelstrompfade zusammen. Aufgrund der ausgeprägten richtungsabhängigen Empfindlichkeit der Hall-Sensoren werden nur die Feldkomponenten in Richtung der Sensorflächennormalen bestimmt. Die Abbildungen 6.10 und 6.11 geben einen Überblick über die berücksichtigten Strompfade. Dabei handelt es sich um die vertikalen Hin- und Rückleiter zum Schaltgerät, die Strompfade im Schaltgerät, die Kupferbolzen in der Vakuumröhre sowie die Kontaktscheiben. Die Komponenten lassen sich in drei Gruppen einteilen.

- Der Lichtbogen selbst, der mit der Nummer 5 benannt ist. Er verursacht die magnetische Flussdichte $B_{n,\text{Libo}}$ im Sensor n .
- Strompfade durch die Kontaktscheiben, die mit den Nummern 4 und 6 benannt sind. Sie verursachen die magnetische Flussdichte $B_{n,\text{Kontakt}}$ im Sensor n .
- Starre Strompfade, die mit 1, 2, 3, 8 und 9 benannt sind. Sie verursachen die magnetische Flussdichte $B_{n,\text{starr}}$ im Sensor n .

Die gesamte magnetische Flussdichte in Sensor n ergibt sich durch Bilden der Summe aller Teilkomponenten.

$$B_n = B_{n,\text{Libo}} + B_{n,\text{Kontakt}} + B_{n,\text{starr}} \quad (6.3)$$

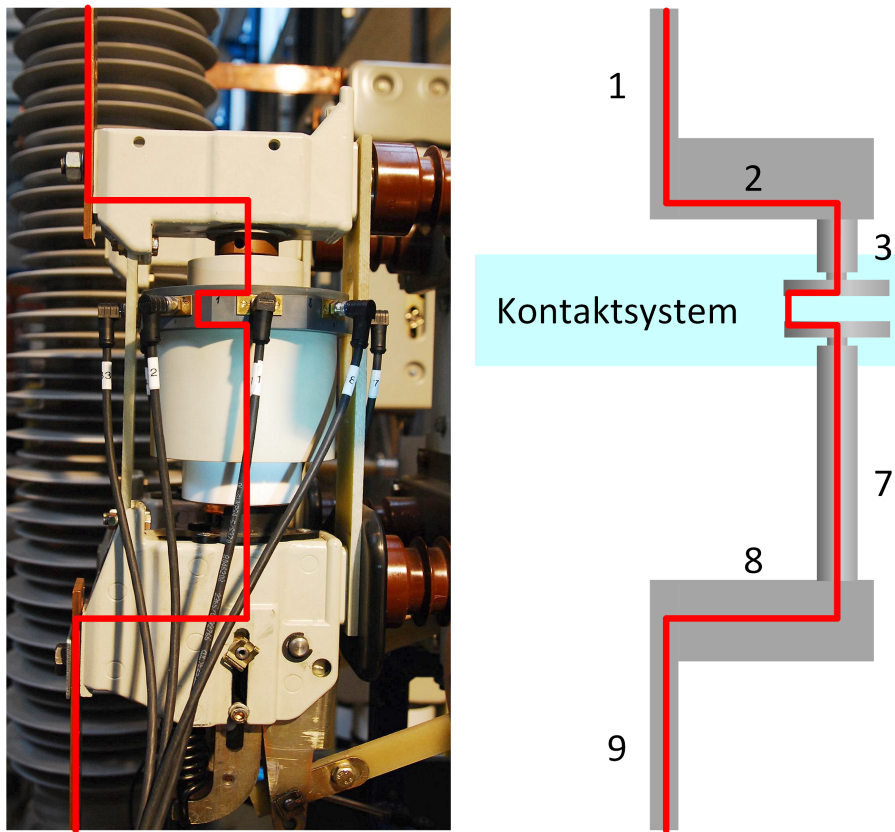


Abbildung 6.10.: Links: Fotografie des Prüflings. Rot dargestellt sind alle in der mathematischen Nachbildung berücksichtigten Strompfade. Rechts: Schematische Darstellung, blau unterlegt, das Kontaktsystem, welches in Abbildung 6.11 im Detail dargestellt ist

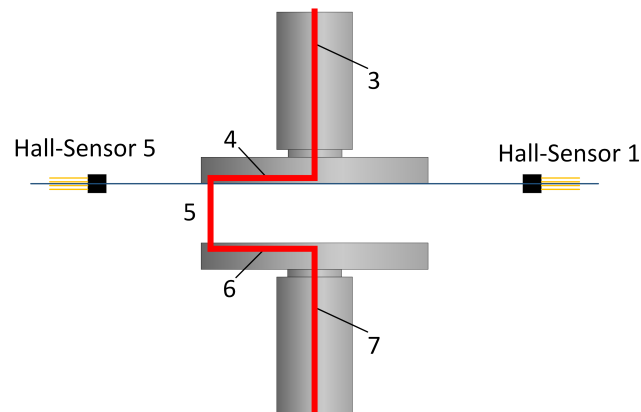


Abbildung 6.11.: Detaildarstellung des Kontaktsystems, welches in Abbildung 6.10 blau unterlegt ist. Rot dargestellt sind die im mathematischen Modell berücksichtigten Strompfade.

6.4.1. Modellierung des Lichtbogens

Abbildung 6.12 zeigt die Draufsicht auf den Kathodenkontakt. Es sind alle acht Sensoren zu erkennen, die auf einem Orbital mit konstantem Radius um den Ursprung platziert sind. Es sind ebenfalls die Größen x_1 , x_8 , y_1 und y_8 zu erkennen. Sie stellen die x- und y-Distanzen des Lichtbogens zu den jeweiligen Sensoren dar und werden im weiteren Verlauf als x_n und y_n bezeichnet. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Sensoren untereinander jeweils einen Winkelabstand von 45° aufweisen. Der Winkel φ_n ist dem entsprechend für Sensor 1 als null definiert und steigt mit jedem weiteren Sensor um 45° .

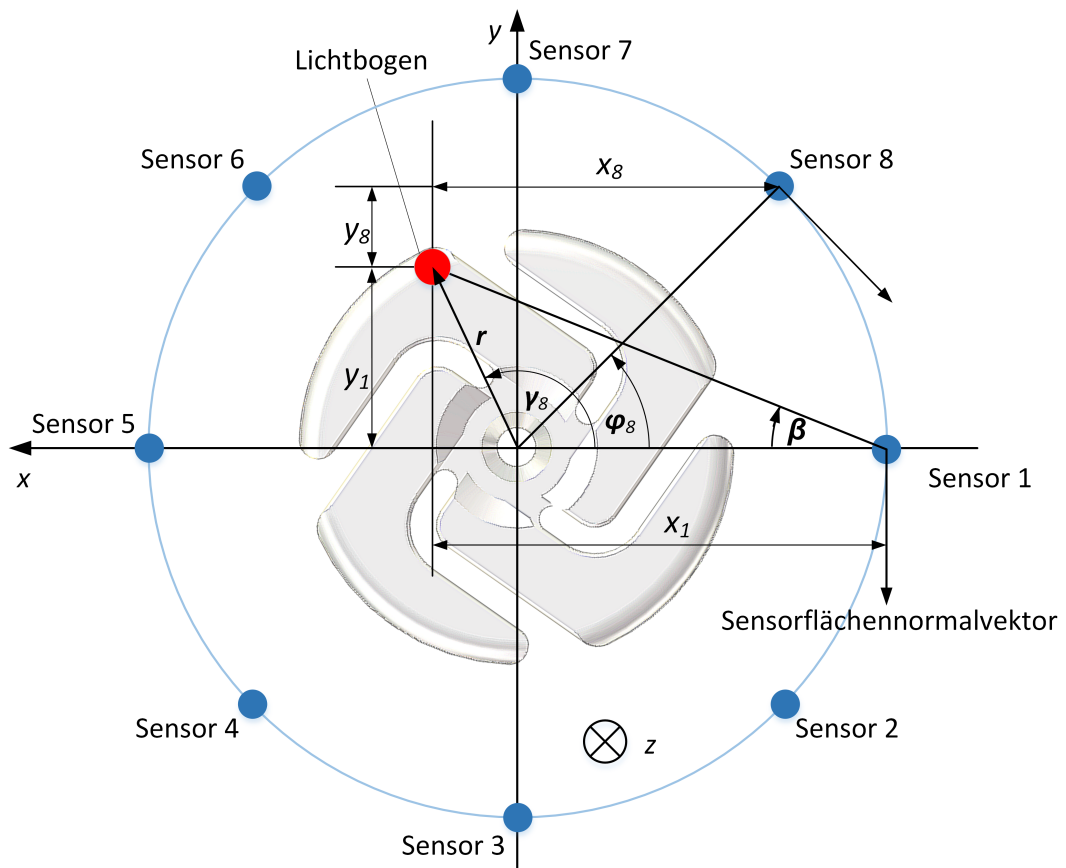


Abbildung 6.12.: Draufsicht auf die Kontaktoberfläche der Kathode. Übersicht aller relevanten geometrischen Größen zur Erstellung der mathematischen Nachbildung.

Der Lichtbogen stellt den einzigen Strompfad dar, der sich sowohl auf der Ebene des Sensororbitals als auch senkrecht zu dieser bewegt. Seine Länge wird durch den

Kontakthub bestimmt. Abbildung 6.13 zeigt die zur Berechnung der magnetischen Flussdichte $B_{n, \text{Libo}}$ verwendeten geometrischen Faktoren.

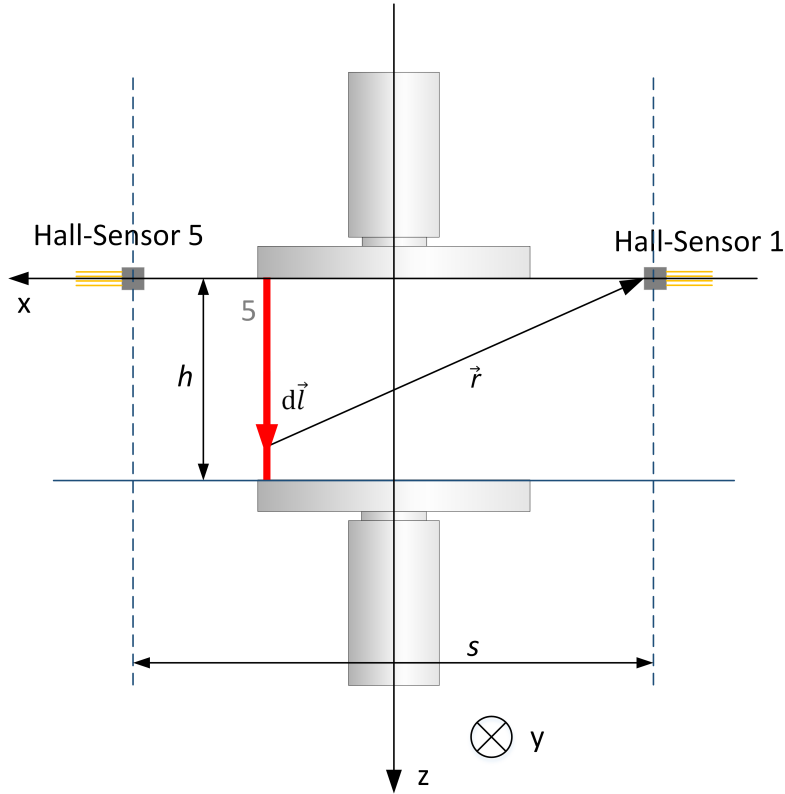


Abbildung 6.13.: Darstellung der mathematischen Nachbildung des Lichtbogens.

$$d\vec{l} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ dz \end{pmatrix}, \vec{r} = \begin{pmatrix} -x_n \\ -y_n \\ -z \end{pmatrix}, |\vec{r}|^3 = (x_n^2 + y_n^2 + z_n^2)^{\frac{3}{2}}$$

Eingesetzt in Gleichung 6.2 ergibt sich für die magnetische Flussdichte in Sensor n folgender Ausdruck:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot (y_n \vec{e}_x - x_n \vec{e}_y)}{4\pi} \cdot \frac{h}{(x_n^2 + y_n^2) \cdot \sqrt{x_n^2 + y_n^2 + h^2}} \quad (6.4)$$

Das in Gleichung 6.4 beschriebene Feld besitzt Komponenten in x - und y -Richtung. Ein idealer Hall-Sensor detektiert nur Feldkomponenten, die in Richtung seiner Sensorflächennormalen gerichtet sind. Die Sensorflächennormalen der Sensoren sind,

wie die Sensoren selbst, von Sensor zu Sensor um je 45° oder auch um φ_n verdreht. Dementsprechend kann der Anteil des magnetischen Flusses in Sensor n , der in Richtung der Sensorflächennormalen wirkt, durch Bildung des folgenden Skalarproduktes ermittelt werden.

$$B_{n,\text{Libo}} = \vec{B} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \varphi_n \\ -\cos \varphi_n \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

Als Resultat ergibt sich für die magnetische Flussdichte in Sensor n , die in Richtung der Sensorflächennormalen wirkt, folgender Ausdruck:

$$B_{n,\text{Libo}} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot (x_n \cos \varphi_n - y_n \sin \varphi_n)}{4\pi} \cdot \frac{h}{(x_n^2 + y_n^2) \cdot \sqrt{x_n^2 + y_n^2 + h^2}} \quad (6.6)$$

6.4.2. Modellierung der Strompfade durch die Kontaktscheiben

In einem realen Kontaktsystem wird der Strompfad durch die Kontaktgeometrie gezielt beeinflusst. In diesem Abschnitt werden die Kontakte als Plattenkontakte angenähert. Der sich so ergebende Strompfad durch eine Kontaktscheibe, der von dem Kontaktbolzen bis zum Lichtbogen reicht, beschreibt eine Gerade. Diese ist in Abbildung 6.12 mit r benannt. Wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, wird der Sensorhalter so ausgerichtet, dass das Sensororbital auf der Höhe der unteren Kante des feststehenden Kontaktes liegt. Auf diese Weise verursacht Strompfad 4 in den Sensoren ein zu vernachlässigendes, kleines Feld. Daher wird im weiteren Verlauf lediglich der Strompfad 6, welcher durch den beweglichen Kontakt verläuft, berücksichtigt. Abbildung 6.14 gibt einen Überblick über die zur Modellierung erforderlichen geometrischen Faktoren.

Zur weiteren Modellierung werden Zylinderkoordinaten verwendet. Die Parametrisierung der einzelnen geometrischen Faktoren wird mit der Hilfsvariablen k vorgenommen. Um nur ein eindimensionales Integral lösen zu müssen, wird als Raumwinkel der Winkel ψ eingeführt. Dabei handelt es sich um eine Winkeldifferenz, die für die acht Sensoren folgendermaßen definiert ist: $\psi_n = \gamma - \varphi_n$.

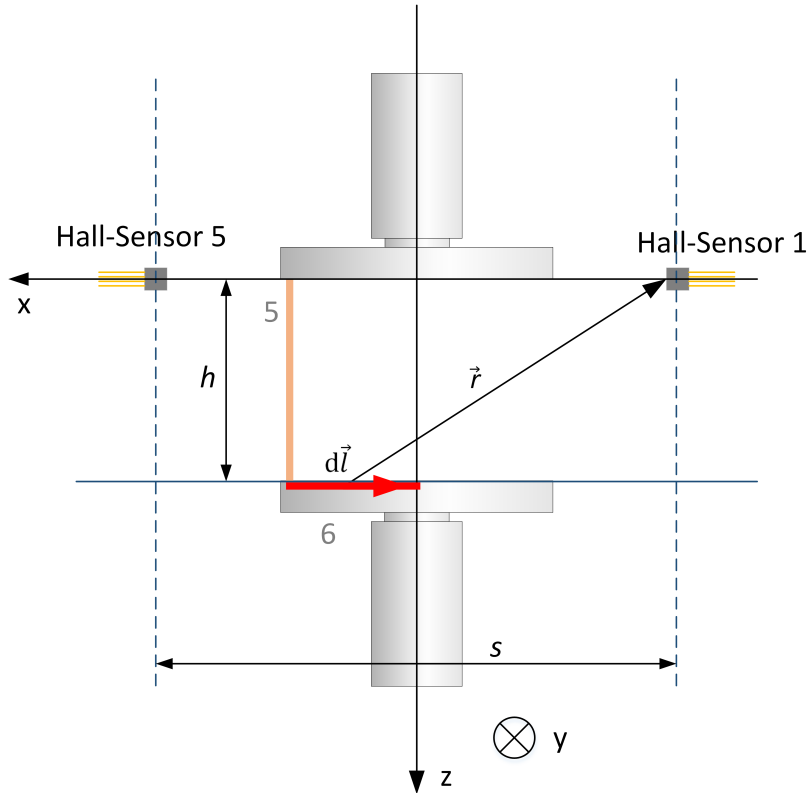


Abbildung 6.14.: Darstellung der mathematischen Nachbildung des Strompfades 6 durch die bewegliche Kontaktscheibe.

$$d\vec{l} = \begin{pmatrix} dk \cdot \cos \psi_n \\ -dk \cdot \sin \psi_n \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{r} = \begin{pmatrix} -s/2 + k \cdot \cos \psi_n \\ -k \cdot \sin \psi_n \\ -h \end{pmatrix}$$

$$|\vec{r}|^3 = \left(\left(-s/2 + k \cdot \cos \psi_n \right)^2 + \left(k \cdot \sin \psi_n \right)^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}$$

Gemäß Abbildung 6.14 weist der Sensorflächennormalenvektor in negative y-Richtung, daher folgt für die relevante magnetische Flussdichte:

$$B_{n,\text{Kontakt}} = -\vec{B} \cdot \vec{e}_y. \quad (6.7)$$

Die Länge des Strompfades 6 ist der Bahnradius r . Nach Einsetzen in Gleichung 6.2

und Integration von null bis r erlangt man den Ausdruck für die magnetische Flussdichte in Sensor n , welche in Sensornormalenrichtung wirkt.

$$B_{n,\text{Kontakt}} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot h \cdot \cos \psi_n}{4\pi}. \quad (6.8)$$

$$\left\{ \frac{8r - 4s \cdot \cos \psi_n}{(4h^2 + s^2 \cdot \sin^2 \psi_n) \cdot \sqrt{4r^2 - 4sr \cdot \cos \psi_n + 4h^2 + s^2}} - \frac{4s \cdot \cos \psi_n}{(4h^2 + s^2 \cdot \sin^2 \psi_n) \cdot \sqrt{4h^2 + s^2}} \right\}$$

6.4.3. Modellierung der starren Strompfade

Die Berechnung der Feldanteile, die durch die starren Strompfade verursacht werden, können aus den Gleichungen für den Lichtbogen und den Strompfad durch die bewegliche Kontaktscheibe abgeleitet werden. Dazu müssen die Integrationsgrenzen entsprechend der geometrischen Lage des Strompfades angepasst werden. Im praktischen Einsatz des Messsystems hat sich gezeigt, dass die Verwendung der berechneten Feldkomponenten zur Kompensation der Einflüsse der starren Strompfade bei real gemessenen Signalen zu erheblichen Fehlern führt. Die Gründe hierfür werden in der nicht vollständigen Berücksichtigung aller stromführenden Leitungen im Labor sowie in dem in Abschnitt 6.3 erwähnten Stromverdrängungseffekt in den massiven elektrischen Leitungen vermutet. Somit weicht der reale Strompfad von dem berechneten Modell ab und führt zu einem Fehler. Aus diesem Grund wird der Einfluss der starren Strompfade messtechnisch ermittelt. Dazu wurde anstelle des Prüflings eine Metallstange mit 12 mm Durchmesser in ein Schaltgerät eingebaut und unter üblichen Testbedingungen die Hall-Sensorsignale während eines sinusförmigen Stromimpulses aufgezeichnet. Dieses Vorgehen entspricht im Wesentlichen einem „Schaltvorgang“ ohne Kontakttrennung, wie er in Abschnitt 6.3 beschrieben, und als Referenzmessung bezeichnet wurde. Ein Vorteil dieses Vorgehens ist es, dass alle messbaren Einflüsse aufgezeichnet werden können, ohne die für eine mathematische Nachbildung nötigen Vereinfachungen in Kauf nehmen zu müssen. Im weiteren Verlauf werden die so ermittelten Flussdichten als $B_{n,\text{starr,Ref}}$ bezeichnet.

6.4.4. Addition der Flussdichten aller betrachteter Strompfade

Die während eines Ausschaltversuchs zu messenden magnetischen Flussdichten der einzelnen Sensoren lassen sich gemäß Gleichung 6.3 zusammensetzen. In den vorangegangenen Abschnitten wurden die einzelnen Komponenten von B_n hergeleitet und beschrieben. Um die Summe zu bilden, müssen alle Komponenten von den gleichen Variablen abhängig sein. Daher muss $B_{n,\text{Libo}}$ in Zylinderkoordinaten überführt und die Verwendung des Differenzwinkels ψ_n berücksichtigt werden. Es werden folgende Koordinatentransformationen vorgenommen:

$$x_n = \frac{s}{2} \cdot \cos \varphi_n - r \cdot \cos \gamma$$

$$y_n = -\frac{s}{2} \cdot \sin \varphi_n + r \cdot \sin \gamma$$

$$\psi_n = \gamma - \varphi_n.$$

Somit ergibt sich folgender Ausdruck:

$$B_{n,\text{Libo}} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot \left(s/2 - r \cos \psi_n \right)}{4\pi}. \quad (6.9)$$

$$\frac{h}{\left(s^2/4 - sr \cdot \cos \psi_n + r^2 \right) \cdot \sqrt{s^2/4 - sr \cdot \cos \psi_n + r^2 + h^2}}.$$

Die gemessenen Hall-Sensorspannungen lassen sich gemäß Gleichung 6.1 nach Abzug der Offsetspannungen $U_{\text{offset,hall}}$ nach folgender Gleichung mit den tatsächlichen magnetischen Flussdichten in Verbindung bringen:

$$U_{n,\text{hall}} = K_n \cdot I_{\text{supply}} \cdot B_n \quad (6.10)$$

In einem weiteren Schritt lässt sich die Summe aller beschriebenen Flussdichteanteile bilden, die zur resultierenden Sensorspannung führt. Da alle Flussdichteanteile

identische lineare Abhängigkeiten von I , K_n und I_{supply} aufweisen, lassen sich diese ausklammern.

$$U_{n,\text{hall}} = \frac{\mu_0 I \cdot K_n I_{\text{supply}}}{4\pi} \cdot (f_{n,\text{Libo}}(r, \psi_n, h) + f_{n,\text{Kontakt}}(r, \psi_n, h) + f_{n,\text{starr}}(h)) \quad (6.11)$$

Die aufgestellten Ausdrücke 6.8 und 6.9 für die Feldkomponenten, $B_{n,\text{Kontakt}}$ und $B_{n,\text{Libo}}$, weisen eine Abhängigkeit von r , ψ_n und h auf, und somit auch die Funktionen $f_{n,\text{Libo}}$ und $f_{n,\text{Kontakt}}$.

Die durch den Einfluss des gesamten starren Strompfades verursachten Hall-Spannungen lassen sich wie folgt ausdrücken:

$$U_{n,\text{Ref}} = \frac{\mu_0 I_{\text{Ref}} \cdot K_n I_n}{4\pi} \cdot f_{n,\text{starr,Ref}}. \quad (6.12)$$

Beide Spannungen $U_{n,\text{hall}}$ und $U_{n,\text{Ref}}$ werden durch den feldverursachenden Strom geteilt, um die Signalveränderungen zu eliminieren, die durch die Sinushalbwelle des Stromes verursacht wird. Ein Abzug der durch die starren Strompfade verursachte Spannungsanteil in den Sensoren führt zu folgendem Ausdruck:

$$\frac{U_{n,\text{hall}}}{I} - \frac{U_{n,\text{Ref}}}{I_{\text{Ref}}} = \quad (6.13)$$

$$\frac{\mu_0 \cdot K_n I_{\text{supply}}}{4\pi} \cdot (f_{n,\text{Libo}}(r, \psi_n, h) + f_{n,\text{Kontakt}}(r, \psi_n, h) + f_{n,\text{starr}}(h) - f_{n,\text{starr,Ref}}).$$

Der Einfluss der starren Strompfade $f_{n,\text{starr}}(h)$ ist an dieser Stelle noch nicht genau beschrieben. Er beinhaltet alle starren Strompfade des Labors, was auch Strompfad 7, den beweglichen Kontaktbolzen, mit einschließt. Nach den hier getroffenen geometrischen Vorgaben wird dieser mit zunehmenden Kontakthub im gleichen Maße kleiner, wie sich der Lichtbogen verlängert. $f_{n,\text{starr,Ref}}$ beinhaltet ebenfalls alle starren Strompfade des Labors. Jedoch sieht er keine Kontaktöffnung vor, sondern wurde mit einer Metallstange anstatt der Vakuumröhre ermittelt. Daher sind hier die Strompfade 3, 4, 5, 6 und 7 zu einem einzigen Linienleiter zusammengefasst, der durch den Ursprung der xy-Ebene in Abbildung 6.12 verläuft. Die Differenz

$f_{n,\text{starr}}(h) - f_{n,\text{starr,Ref}}$ stellt folglich den Einfluss eines einzigen Linienleiters dar. Dabei handelt es sich um jenes Stück von Strompfad 7, um das sich der bewegliche Kontaktbolzen während einer Schalthandlung verkürzt. Der Einfluss dieses Stückes lässt sich analog zur Nachbildung des Lichtbogens modellieren.

$$f_{n,\text{starr}}(h) - f_{n,\text{starr,Ref}} = -\frac{s \cdot h}{s^2/2 \cdot \sqrt{s^2/4 + h^2}} \quad (6.14)$$

An dieser Stelle sind alle Elemente der Gleichung 6.13 bestimmt. Es lässt sich zusammenfassen, dass Gleichung 6.14 für jeden der acht Sensoren den bezogenen magnetischen Fluss in Richtung der Sensorflächennormalen darstellt. Die dabei letztendlich berücksichtigten Strompfade sind der Lichtbogen und der Strompfad durch die bewegliche Kontaktscheibe. Zusätzlich wurde der Einfluss eines Linienleiters, welcher sich zwischen den Kontakten befindet und fest in der Kontaktmitte steht, davon abgezogen. Auf diese Weise ist Gleichung 6.14 kompatibel mit dem Ergebnis der Messwertaufbereitung, wie sie in Abschnitt 6.3 beschrieben wird, und kann somit als Grundlage zur weiteren Berechnung der Lichtbogenposition dienen, wie sie im folgenden Abschnitt erläutert wird.

6.5. Ermittlung der Lichtbogenposition

Wäre es möglich, die Umkehrfunktion von Gleichung 6.13 zu bilden, so könnte man mit dem Einsatz von nur zwei Sensoren die beiden Unbekannten ψ_n und r bestimmen und so die Position des Lichtbogens berechnen. Jedoch handelt es sich bei Gleichung 6.13 um eine injektive Abbildung. Das bedeutet, dass mehrere Kombinationen von ψ_n und r zu der selben magnetischen Flussdichte führen können. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, ist der Einsatz von sogenannten „Look-Up-Tabellen“, wie sie bereits in Kapitel 5.5 erwähnt wurden. Dieses Verfahren sieht vor, dass der Bereich, in dem sich der Lichtbogen aufhalten kann, in einzelne rechteckige Sektoren diskretisiert wird. In dem hier vorgestellten Modell wird eine Kantenlänge von jeweils einem Millimeter zur Diskretisierung verwendet. In einem weiteren Schritt wird Gleichung 6.13 herangezogen, um für alle diskreten Positionen den dazugehörigen bezogenen magnetischen Fluss zu berechnen. Die berechneten Daten werden zusammen mit den dazugehörigen Koordinaten in einer Tabelle gespeichert.

Um einen gesamten Ausschaltprozess abdecken zu können, muss ebenfalls der Kontakthub diskretisiert werden. Für jeden diskreten Schritt des Kontakthubes, in dem hier betrachteten Fall jeweils einen Millimeter, muss eine Look-Up-Tabelle berechnet werden. Im Falle der Rückrechnung von gemessenen Sensordaten zur eigentlichen Lichtbogenposition können aus dieser Tabelle alle Kombinationen von ψ_n und r gesucht werden, die für den Kontakthub und die bezogene Flussdichte zutreffen.

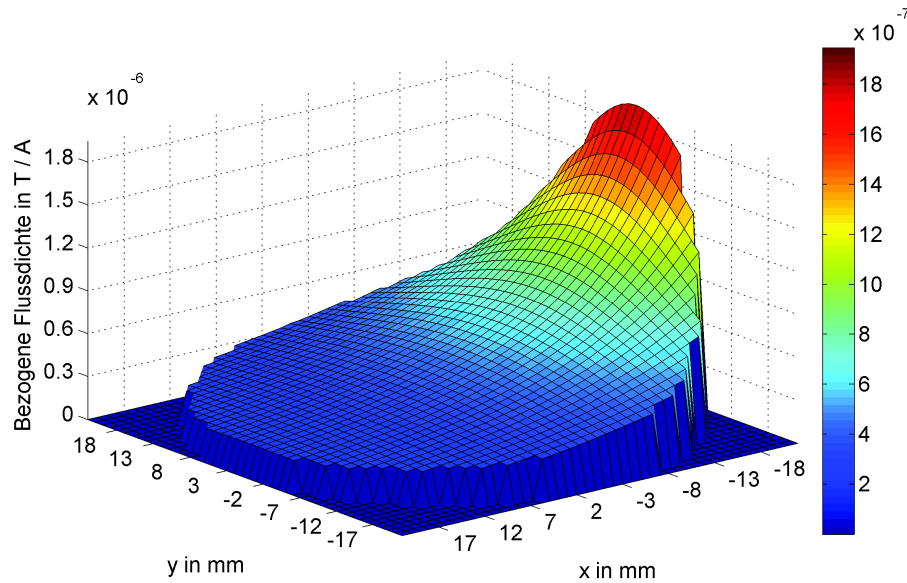


Abbildung 6.15.: Darstellung der bezogenen magnetischen Flussdichte, die durch den Lichtbogen hervorgerufen wird [Elb 2013].

Die Abbildungen 6.15 und 6.16 zeigen die Verteilung der bezogenen magnetischen Flüsse, die durch den Lichtbogen und den Strompfad 6 (die bewegliche Kontaktscheibe) hervorgerufen werden. Die Daten werden für Sensor 1 bei einem Kontakthub von 9 mm berechnet. Eine Addition beider Datensätze würde zu einer fertigen Look-Up-Tabelle für Sensor 1 bei einem Kontakthub von 9 mm führen. Befindet sich der Lichtbogen in der sensornahen Hälfte der Kontaktoberfläche, führt dies zu einem negativen Vorzeichen der von dem Kontakt verursachten magnetischen Flussdichte. Somit schwächt er die durch den Lichtbogen verursachte Flussdichte im Sensor 1. Das Gegenteilige gilt für sensorferne Positionen des Lichtbogens. Demnach wirkt der Einfluss des Strompfades 6 durch die bewegliche Kontaktscheibe dem Einfluss des Lichtbogens entgegen und führt zu einer Senkung der Abstandsabhängigkeit des an der Sensorposition zu messenden magnetischen Flusses. Das hat zur Folge, dass die Unterscheidung zweier naheliegender Positionen erschwert wird, das Auflösungsver-

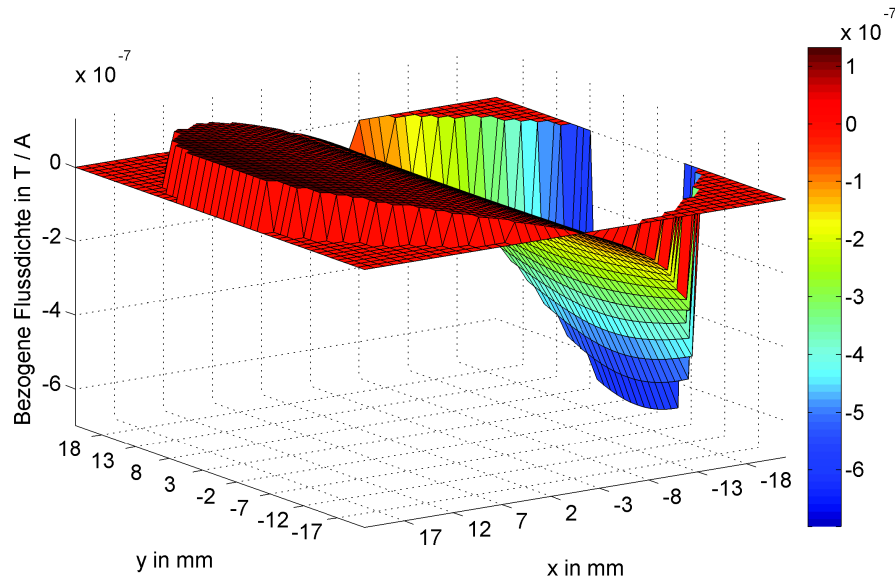


Abbildung 6.16.: Darstellung der bezogenen magnetischen Flussdichte, die durch den Strompfad 6, welcher durch den beweglichen Kontakt verläuft, hervorgerufen wird [Elb 2013].

mögen des Messsystems nimmt folglich ab.

Überträgt man das Entgegenwirken der beiden Verteilungen der bezogenen magnetischen Flussdichte auf eine vollständige Kreisbahn des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche, so entsteht eine Verzerrung des Verlaufes der resultierenden bezogenen Flussdichte an der Position des Sensors. Um diesen Effekt für einen Lichtbogen zu verdeutlichen, der eine Kreisbahn auf der Kontaktoberfläche beschreibt, sind in Abbildung 6.17 für verschiedene vorgegebene Kreisbahnradien die bezogenen Flussdichten für Sensor 1 aus der entsprechenden Look-Up-Tabelle ausgelesen worden und über den Winkel ψ_1 aufgetragen.

Die Quantisierung, die durch die Diskretisierung der Kontaktoberfläche in 1-mm-Schritten vorgenommen wurde, ist klar zu erkennen. Im sensorfernen Bereich hat der Einfluss der Kontaktscheibe sein Maximum. Dies führt in diesem Bereich zu einer Glättung des Verlaufes. Diese Glättung nimmt mit steigendem Laufbahnradius und somit mit größer werdendem Maximalabstand des Lichtbogens zum Sensor weiter zu. Für einen Laufbahnradius von 20 mm bedeutet der entsprechende Verlauf der bezogenen magnetischen Flussdichte in Abbildung 6.17, dass Sensor 1 im Bereich von $\psi = 90^\circ$ bis $\psi = 270^\circ$ nahezu keinen Beitrag zur Lokalisierung des Lichtbogens beitragen kann. Im sensornahen Bereich wirkt sich der Einfluss der Kontaktscheibe

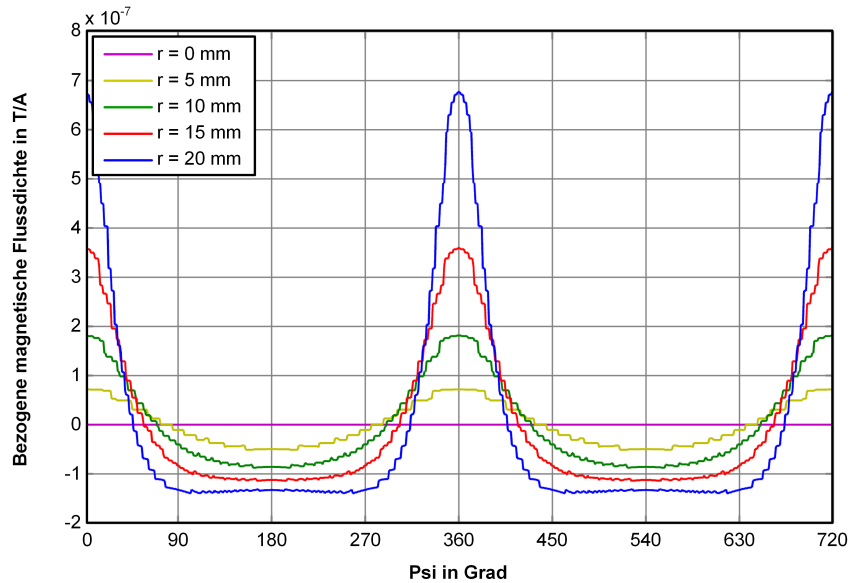


Abbildung 6.17.: Aus einer Look-Up-Tabelle ausgelesener Verlauf der bezogenen magnetischen Flussdichte für verschiedene Kreisbahnradien auf der Kontaktoberfläche.

gegenteilig aus und erhöht die Positionsabhängigkeit des bezogenen magnetischen Flusses. Die Folge ist ein ausgeprägter Peak in dem entsprechenden Signal, während der Lichtbogen am Sensor vorbeiläuft, was somit im sensornahen Bereich zu einem erhöhten Auflösungsvermögen des Sensors führt. Diese Betrachtung führte zu einer Entscheidung für acht Sensoren, um in der Lage zu sein, die gesamte Kontaktoberfläche mit einer möglichst hohen Auflösung erfassen zu können.

Die zuvor erwähnte Uneindeutigkeit der Gleichung 6.13 führt an dieser Stelle dazu, dass für eine Kombination aus gemessener Flussdichte und Kontakthub mehrere mögliche Positionen aus einer Look-Up-Tabelle ausgelesen werden. So ist es jedem Sensor nur möglich, einen Abstand zum Lichtbogen zu detektieren, ohne eine Aussage über die Richtung zum Lichtbogen treffen zu können. Durch die Diskretisierung der Kontaktoberfläche ist in jedem einzelnen diskreten Sektor ein konkreter Wert der bezogenen Flussdichte hinterlegt. Wie groß die Abweichung der gemessenen bezogenen Flussdichte und dem für eine Position hinterlegten Wert sein darf, damit diese Position zu einer Übereinstimmung führt, wird durch einen „Unschärfefaktor“ definiert. Da für sensorferne Positionen des Lichtbogens die bezogene Flussdichte mit zunehmenden Abstand zum Sensor nahezu keine weitere Reduktion erfährt, ähneln sich die in der entsprechenden Look-Up-Tabelle hinterlegten Werte stark. Demnach

werden durch den Einsatz des Unschärfefaktors für sensorferne Lichtbogenpositionen viele Übereinstimmungen in der Look-Up-Tabelle gefunden. Für sensornahe Positionen verhält es sich umgekehrt. In Abbildung 6.18 ist die diskretisierte Kontaktoberfläche schematisch dargestellt. Es sind für den sensorfernen Fall und den sensornahen Fall die erkannten Lichtbogenpositionen grau bzw. schwarz markiert. Während für sensornahe Positionen des Lichtbogens die möglichen Positionen recht scharf begrenzt sind, ergibt sich für sensorferne Positionen ein sehr großer Bereich möglicher Aufenthaltsorte.

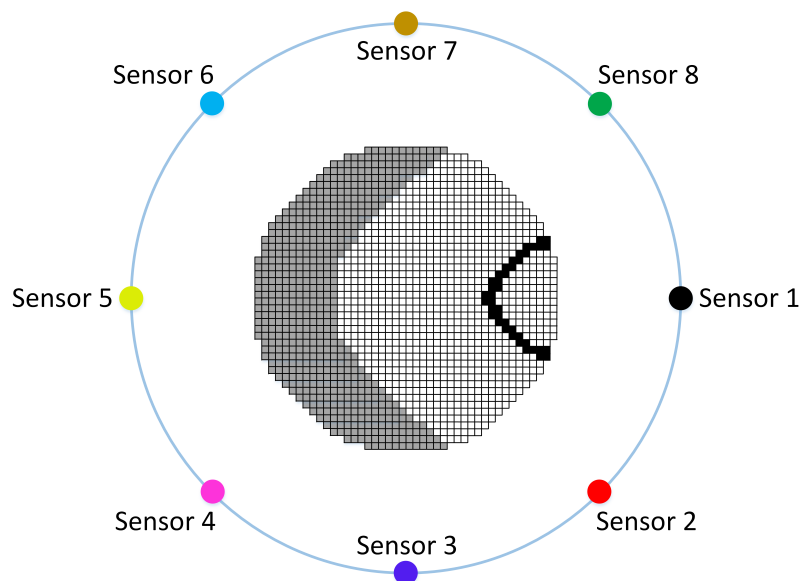


Abbildung 6.18.: Schematische Darstellung der diskretisierten Kontaktoberfläche. Grau markiert ist die mögliche Positionsbestimmung einer sensorfernen Lichtbogenposition durch Sensor 1, schwarz markiert ist das Beispiel einer sensornahen Lichtbogenpositionsbestimmung.

In einem weiteren Schritt werden die erkannten, möglichen Positionen aller acht Hall-Sensoren auf der diskretisierten Kontaktoberfläche überlagert. Diejenige Schnittfläche, auf die die meisten Sensoren gleichzeitig verweisen, wird als Lichtbogaufenthaltsraum identifiziert. Die gesamte Prozedur wird für jeden Sample der Messdaten wiederholt und liefert so den Verlauf der Lichtbogenposition mit einer maximalen zeitlichen Auflösung, die der der verwendeten Messkarte zur Aufnahme der Hall-Spannungen entspricht. Der dafür notwendige Rechenaufwand beträgt für einen Messdatensatz, bestehend aus acht Hall-Signalen, zum gegenwärtigen Zeitpunkt etwa 20 Sekunden.

6.6. Messtechnische Überprüfung der mathematischen Nachbildung

In diesem Abschnitt wird das theoretisch hergeleitete mathematische Modell, welches als Grundlage zur Erstellung der Look-Up-Tabellen dient, mit real gemessenen Signalen der Hall-Sensoren verglichen. Zur Überprüfung der mathematischen Behandlung wird eine statische Elektrodenanordnung erstellt, die es ermöglicht, die Position der Strompfade, und somit auch die des Lichtbogenstrompfades, vorzugeben. In einem weiteren Schritt wird mit einer kommerziellen Vakuumröhre ein einzelner Ausschaltvorgang durchgeführt und die durch die Look-Up-Methode ermittelte Lichtbogenbahn mit den Abbrandspuren auf den Kontaktoberflächen verglichen.

6.6.1. Messungen an einer statischen Elektrodenanordnung

Zur Überprüfung des in Abschnitt 6.4 hergeleiteten mathematischen Modells wird eine statische Elektrodenanordnung erstellt. Abbildung 6.19 zeigt eine CAD-Darstellung dieser Anordnung. Es handelt sich dabei um zwei Plattenkontakte aus Aluminium, die eine Stärke von 10 mm und einen Durchmesser von 50 mm haben. Der Lichtbogen wird durch eine M8-Gewindestange nachgebildet. Der Kontaktabstand kann mittels runder PVC-Scheiben, welche zwischen den Plattenkontakten verschraubt werden, in 2 mm Schritten eingestellt werden.

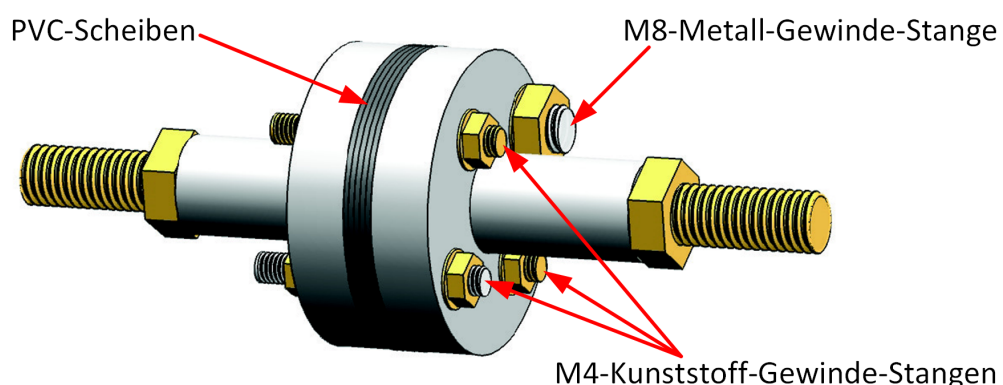


Abbildung 6.19.: CAD-Darstellung der Elektrodenanordnung für die experimentelle Überprüfung des mathematischen Modells [Elb 2013].

In Abbildung 6.19 sind ebenfalls drei M4-Gewindestangen zu erkennen, die aus Kunststoff ausgeführt sind. Ihre Aufgabe ist es, eine gleichmäßige Kräfteverteilung auf die PVC-Scheiben im Kontaktspace zu gewährleisten. Die Elektrodenanordnung befindet sich in einer Haltevorrichtung, die ebenfalls den Sensorhalterring mit den acht Hall-Sensoren aufnimmt. Auf diese Weise ist es möglich, einen stehenden Lichtbogen zwischen einer Anordnung aus Plattenkontakten zu imitieren. Die Elektrodenanordnung kann um ihre Längsachse gedreht werden, um die Position des Lichtbogens von Messung zu Messung zu variieren. Dieser Aufbau wird an Stelle des üblichen Vakuumschaltgerätes in die synthetische Schalterprüfanlage eingebaut, und anschließend werden Messungen mit sinusförmigen Stromhalbschwingungen durchgeführt.

Diesen Messungen gehen, gemäß dem in Abschnitt 6.4 beschriebenen Vorgehen, Referenzmessungen voraus, bei denen die Elektrodenanordnung durch eine mittig angeordnete Metallstange mit 12 mm Durchmesser ersetzt wird. Nach Berücksichtigung der einzelnen Sensorempfindlichkeiten sowie der Versorgungsstromhöhe zeigen die so aufgenommenen Hall-Signale identische, sinusförmige Verläufe der magnetischen Flussdichten an den Sensorpositionen. Im Anschluss werden Messungen mit der Elektrodenanordnung durchgeführt.

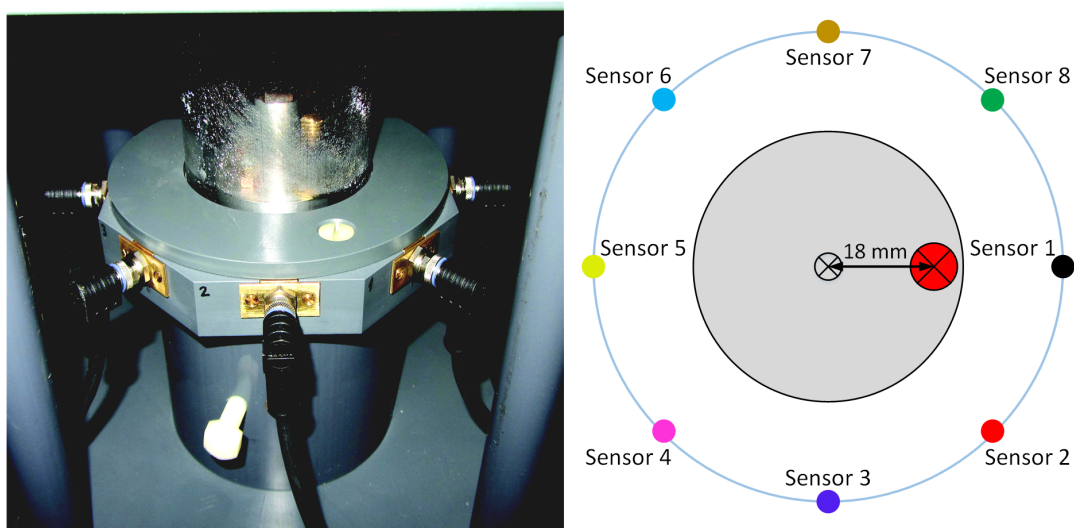


Abbildung 6.20.: Links: Fotografie des Testaufbaus mit installiertem Sensorhalterring [Elb 2013]. Rechts: Schematische Darstellung der Positionierung des Lichtbogens während der beschriebenen Testmessung.

Abbildung 6.20 zeigt die oben beschriebene Haltevorrichtung, die mit dem Sensorhalterring und der Elektrodenanordnung ausgestattet ist. Zusätzlich ist die geome-

trische Ausrichtung der Elektrodenanordnung in Bezug auf die Position der acht Hall-Sensoren für die im weiteren Verlauf exemplarisch beschriebene Messung dargestellt. Die Lichtbogennachbildung wird mit einem Bahnradius von 18 mm vor Sensor 1 positioniert. Der Plattenabstand wird auf 6 mm eingestellt. Die Höhe des sinusförmigen Stromes beträgt 10 kA Effektivwert.

Die gemessenen Signale der Hall-Sensoren weisen, wie der Hochstrom selbst, die Form einer Sinushalbwellen auf. Jedoch unterscheiden sich die Amplituden der einzelnen Signale entsprechend den Abstand des jeweiligen Sensors zum Lichtbogen voneinander. In einem weiteren Schritt werden die Sensorempfindlichkeiten sowie die individuellen Sensorversorgungsströme berücksichtigt. Durch Division durch den Verlauf des Stromes werden die bezogenen magnetischen Flüsse für alle acht Sensorsignale gebildet. Das gleiche Vorgehen wird mit den Messdaten der zuvor durchgeführten Referenzmessung durchgeführt. Nach dieser Prozedur weisen die Signale nahezu nur noch Gleichanteile auf, da die Bildung der bezogenen Flussdichte die Sinusform des feldverursachenden Stromes kompensiert. Die Eliminierung der Anteile der starren Strompfade wird durch Abzug der bezogenen magnetischen Flussdichten der Referenzmessung von denen der eigentlichen Messung vorgenommen. Das Resultat kann mit den zuvor berechneten Werten, die in der entsprechenden Look-Up-Tabelle hinterlegt sind, verglichen werden.

Für die hier beschriebene Anordnung ergeben sich Messwerte, die um den Faktor 3 größer sind als die zuvor berechneten Werte. Andere Lichtbogenpositionen ergeben ebenfalls Abweichungen in dieser Größenordnung. Die Ursache hierfür wird in der Stromverteilung in den Plattenkontakten und der Lichtbogennachbildung vermutet. Dies kann zur Folge haben, dass die sich einstellenden Strompfade durch die leitenden Komponenten von jenen abweichen, die zur mathematischen Nachbildung angenommen wurden. Die resultierende Stromverteilung in einem elektrischen Leiter ergibt sich entsprechend der Leitwertverteilung in seinem Inneren. Daher lässt sich annehmen, dass die Stromverteilung in den Plattenkontakten sich nicht auf einen Pfad auf der Oberfläche zurückführen lässt, sondern sich über den gesamten möglichen Querschnitt verteilt. Der äquivalente, infinitesimal dünne Strompfad zur Magnetfeldnachbildung verläuft daher mehr hin zur Mitte der Kontaktplatte. Darüber hinaus wirkt auf die elektrischen Ladungen entsprechend der vorherrschenden magnetischen Felder eine Lorentzkraft. In der hier vorliegenden Anordnung bedeutet dies eine Verlagerung der Stromdichte im Lichtbogen nach außen in Richtung größerer Radien. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte lassen sich neue Strompfade

durch die Kontaktplatten und den Lichtbogen definieren. Dabei wird berücksichtigt, dass die neuen Strompfade sich im Inneren der Komponenten befinden sollen, die sie nachbilden. Abbildung 6.21 verdeutlicht diesen Vorgang und stellt die neu platzierten Strompfade dar.

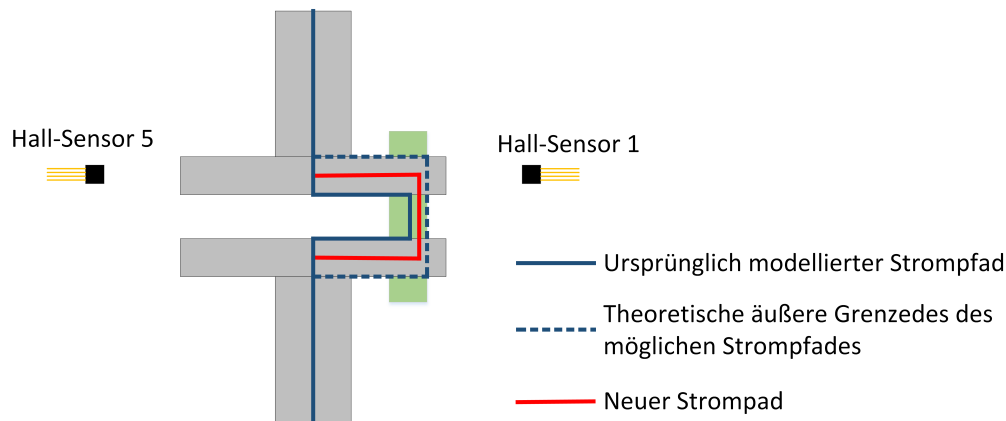


Abbildung 6.21.: Darstellung verschiedener Strompfade zur Nachbildung der Elektrodenanordnung.

Die neuen Strompfade durch die Kontakte liegen in der Mitte der Plattenkontakte, deren Dicke jeweils 10 mm beträgt. Dadurch vergrößert sich die Länge des Lichtbogenstrompfades um 10 mm auf nun 16 mm. Die Verschiebung der Stromdichte in der Lichtbogennachbildung wird durch eine Vergrößerung des Bahnradius von 18 mm auf 20 mm berücksichtigt.

Abbildung 6.22 zeigt eine Gegenüberstellung der neu berechneten Werte der bezogenen magnetischen Flussdichte aller acht Sensoren mit den tatsächlich gemessenen. Die maximale Abweichung liegt nun bei 7 % in Bezug auf den berechneten Wert von Sensor 1. Es ist zu erkennen, dass es möglich ist, durch die beschriebene Verschiebung der Strompfade zur Nachbildung einer plausiblen Stromdichteverteilung innerhalb der geometrischen Grenzen des Materials eine magnetische Flussdichteverteilung nachzubilden, die den gewonnen Messergebnissen nahezu entspricht.

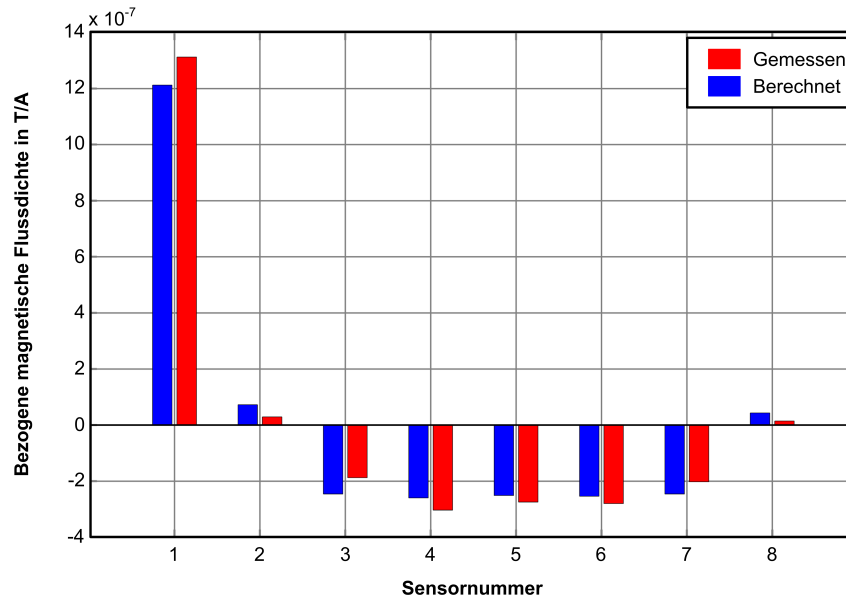


Abbildung 6.22.: Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Werte der bezogenen magnetischen Flussdichte unter Annahme neuer Strompfade gemäß Abbildung 6.21.

6.6.2. Messung an einer kommerziellen Vakuumröhre

In diesem Abschnitt wird eine Messung während eines Ausschaltversuchs an einer kommerziellen Vakuumschaltröhre beschrieben. Ziel dieser Messung ist es, die gemessenen bezogenen Flussdichten, die Ergebnisse der Look-Up-Tabellen-Auswertung und die Abbrandspuren des Lichtbogens auf den Kontaktoberflächen miteinander zu vergleichen. Zunächst werden mehrere Referenzmessungen mit einer kommerziellen Vakuumröhre mit einem Spiralkontaktsystem von 45 mm Durchmesser durchgeführt. Der Prüfling wird mit einer 50-Hz-Stromhalbschwingung beaufschlagt, ohne die Kontakte zu öffnen. Die Stromhöhe entspricht mit 25 kA Effektivwert dem gleichen Wert wie bei dem folgenden, tatsächlichen Ausschaltversuch. Auf diese Weise kann davon ausgegangen werden, dass die Stromverteilung in den starren Strompfaden außerhalb der Vakuumröhre sich bei beiden Messungen identisch einstellt.

Abbildung 6.23 zeigt die während des Ausschaltversuchs eigentlichen aufgezeichneten und aufbereiteten bezogenen magnetischen Flussdichten aller acht Hall-Sensoren. Es ist zu erkennen, dass der Lichtbogen nach der Kontakttrennung sich vor Sensor 4 etabliert. Daraufhin bewegt er sich auf Sensor 5 zu, ohne dabei den Abstand zu

Sensor 4 zu verändern. 3,6 ms nach Strombeginn (T_2) beschleunigt der Lichtbogen und beginnt einen Vorbeilauf an den Sensoren 6 und 7. Der Lichtbogen erreicht zum Zeitpunkt (T_5) Sensor 8. Dort findet eine abrupte Abnahme des Signals von Sensor 8 und eine ähnlich abrupte Zunahme der Signale von Sensor 1 und 2 statt. In Anbetracht der Position von Sensor 8 an einer Spiralarmspitze kann dies als ein Sprung des Lichtbogens von einem Spiralarm zum nächsten interpretiert werden. 7 ms nach Strombeginn (T_7) findet ein ähnlicher Sprung, weg von Sensor 1 und 2 und hin zu Sensor 3 statt. Danach lässt sich aus den Signalen keine weitere Lichtbogenbewegung mehr ablesen. Ein genauer Vergleich der Signale von Sensor 1, 2 und 8 in dem Zeitbereich zwischen den beiden abrupten Sprüngen führt zu einer widersprüchlichen Aussage. So soll sich der Lichtbogen auf Sensor 2 zubewegen aber gleichzeitig den Abstand zu Sensor 1 und Sensor 8 nahezu konstant halten. Eine mögliche Erklärung dieses Widerspruchs könnte in der Verformung der Lichtbogensäule liegen. Die Folge wäre eine Abweichung der Magnetfeldverteilung von der eines geraden Linienleiters, wie sie bisher für den Lichtbogen modellhaft angenommen wurde. Dementsprechend müsste eine Auswertung der Messergebnisse mittels der Look-Up-Tabellen in diesem Zeitraum zu einer Fehlinterpretation führen.

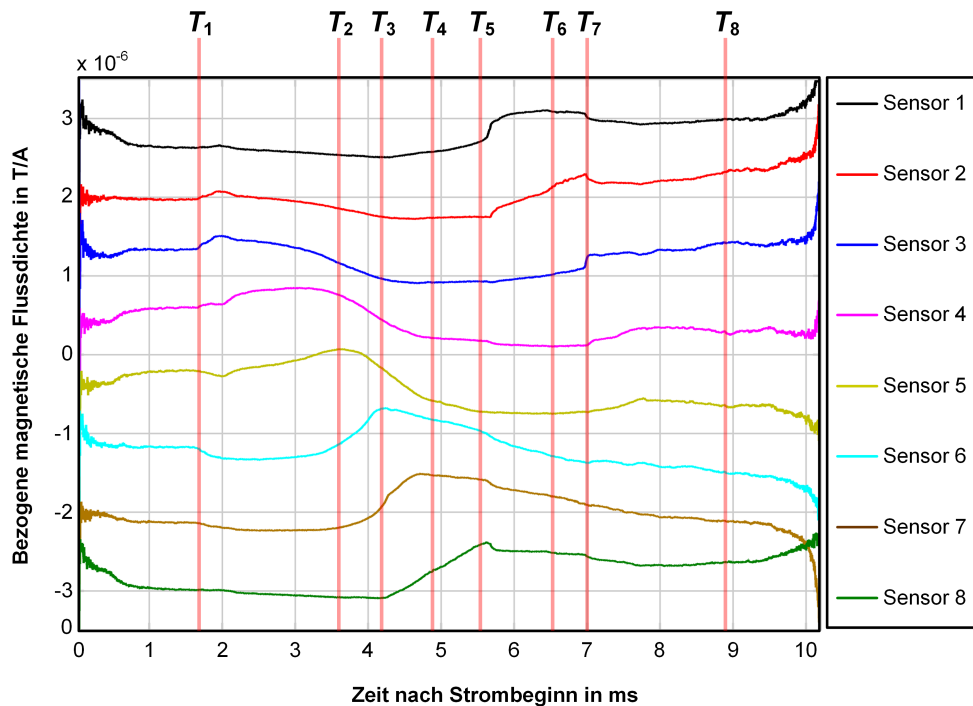


Abbildung 6.23.: Aufbereitete Sensorsignale aller acht Hall-Sensoren. Zur weiteren Positionsbestimmung sind die Zeitpunkte T_1 bis T_8 ausgewählt und markiert.

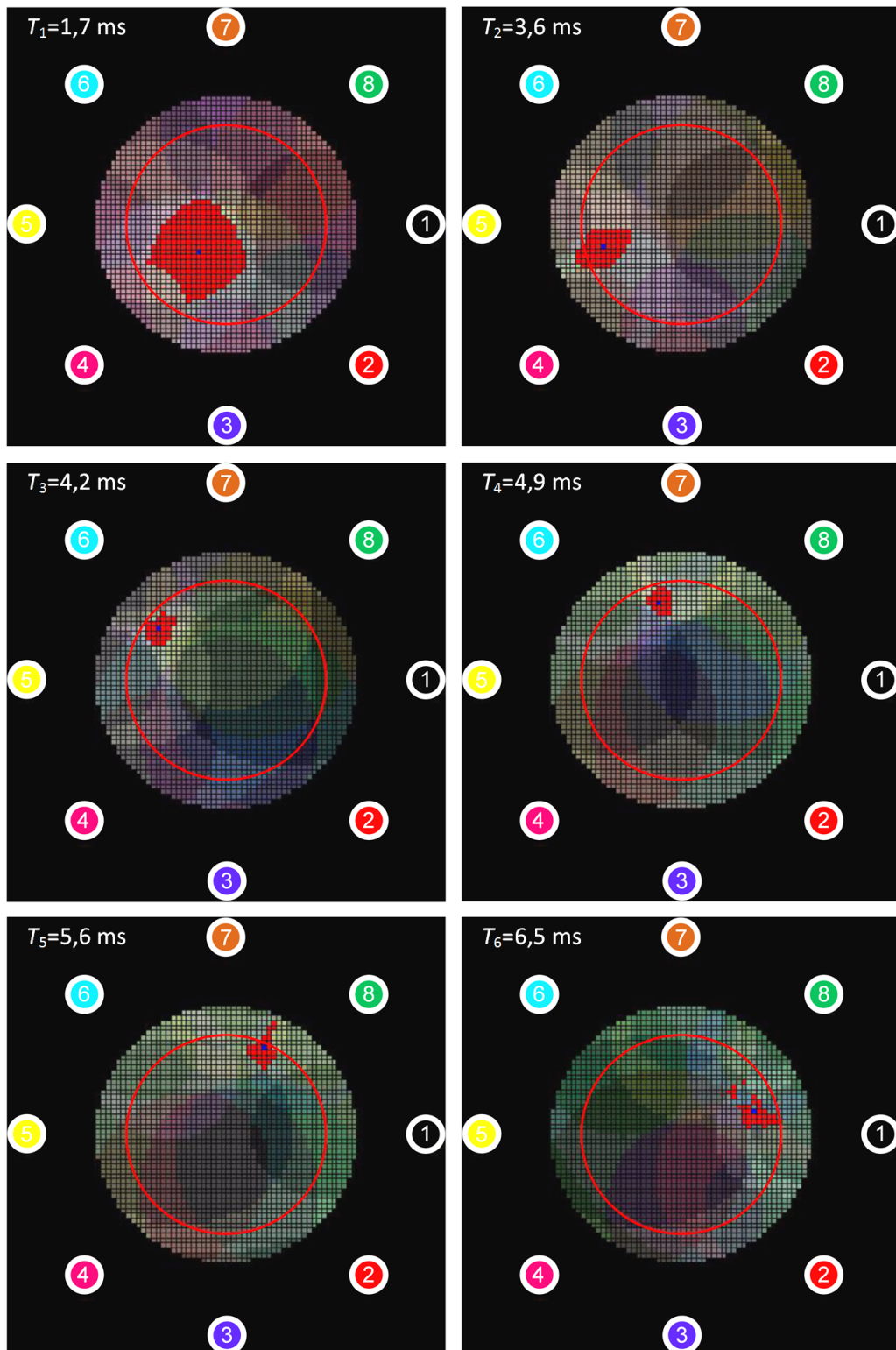


Abbildung 6.24.: Darstellung der Ergebnisse der Positionsbestimmung mittels der Methode der Look-Up-Tabellen für die Zeitpunkte T_1 bis T_6 . Der rote Ring markiert die Außenkante des Kontaktsystems.

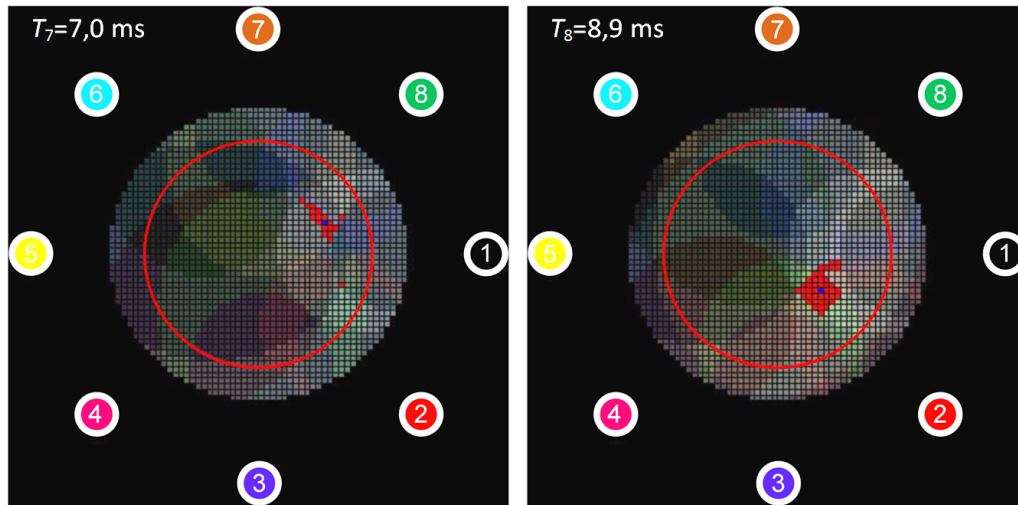


Abbildung 6.25.: Darstellung der Ergebnisse der Positionsbestimmung mittels der Methode der Look-Up-Tabellen für die Zeitpunkte T_7 und T_8 . Der rote Ring markiert die Außenkante des Kontaktsystems.

Die Abbildungen 6.24 und 6.25 zeigen das Ergebnis der Auswertung mittels der Look-Up-Tabellen. Es sind die ermittelten Lichtbogenpositionen zu acht verschiedenen Zeitpunkten während des Ausschaltversuchs dargestellt. Die ausgewählten acht Zeitpunkte sind ebenfalls in Abbildung 6.23 kenntlich gemacht. Dargestellt ist, entsprechend dem in Abschnitt 6.5 beschriebenen Vorgehen, die Kathodenoberfläche. Der rote Ring markiert die Außenkante des Kathodenkontaktes. Zusätzlich ist die Position der einzelnen Sensoren relativ zu der Kathodenoberfläche kenntlich gemacht. Jeder der Sensoren verweist, entsprechend den aus den Look-Up-Tabellen ausgelesenen Positionen, auf einen Bereich, in dem der Lichtbogen vermutet wird. Die Rasterflächen, auf die die meisten Sensoren hinweisen, sind rot eingefärbt. Die Anzahl der Übereinstimmungen für eine vermutlich gefundene Lichtbogenposition ist eine zusätzliche Information über die Eindeutigkeit der Messergebnisse. Wie bereits erwähnt, herrscht zu den Zeitpunkten T_6 und T_7 ein Widerspruch zwischen einigen Signalen der Sensoren, die bereits bei Betrachtung der bezogenen magnetischen Flussdichten erkennbar war. Zu diesen Zeitpunkten führen nur sechs der acht markierten Bereiche zu einer Überlappung.

Eine Betrachtung der ermittelten Lichtbogenpositionen in den Abbildungen 6.24 und 6.25 führt zu den gleichen Schlüssen, wie sie bereits aus den bezogenen magnetischen Flussdichten abgeleitet werden konnten. Bemerkenswert ist der Zeitpunkt T_5 . Es ist zu erkennen, dass der Lichtbogen anscheinend teilweise die Kontaktoberfläche

verlässt. Im Anschluss beginnt mit T_6 und T_7 der Zeitabschnitt mit dem bereits erwähnten Widerspruch. Diese beiden Darstellungen weisen ebenfalls einen weniger klar umrissenen Lichtbogenaufenthaltsraum auf.

Abbildung 6.26 zeigt Fotografien der Kathode und der Anode der verwendeten Vakuumröhre. Die beiden oberen Fotos zeigen die Kathode, blau hinterlegt. Die unteren Fotos zeigen die Anode. Im Hintergrund der Anode ist der Metaldampfschirm zu erkennen. Auf den jeweils rechten Fotos sind die vom Lichtbogen verursachten Abbrandspuren rot markiert.



Abbildung 6.26.: Links: Fotos der Kathode (oben) und der Anode (unten) nach dem Ausschaltversuch. Die Lage der einzelnen Sensoren ist eingetragen. Rechts: Identische Fotos, die Abbrandspuren sind zusätzlich farbig markiert.

Ein Vergleich mit den in Abbildungen 6.24 und 6.25 ausgewiesenen Positionen zeigt eine gute Übereinstimmung bis zum Zeitpunkt T_6 . Der Metaldampfschirm lässt erkennen, dass der Lichtbogen, wie in Abbildung 6.24 zum Zeitpunkt T_5 bereits identifiziert wurde, den Bereich zwischen den Kontakten verlassen hat und sich dem Dampfschirm genähert hat. In dem Bereich vor Sensor 7 bis kurz vor Sensor 1 sind Abbrandspuren am Metaldampfschirm zu erkennen. Zusätzlich weisen die Abbrandspuren auf Kathode und Anode in dem Bereich zwischen Sensor 8 und Sensor 2 erkennbare Unterschiede auf. Abbildung 6.27 zeigt die Kathode schräg von der Seite. Zur genaueren Orientierung sind die Lagen von Sensor 1, 7 und 8 eingetragen. Es sind Abbrandspuren ebenfalls auf der Außenseite der Kathode zu erkennen.



Abbildung 6.27.: Kathode eines Spiralarmkontaktsystems mit 45 mm Durchmesser nach einem einzelnen Ausschaltprozess von 25 kA Effektivwert.

Damit lässt sich schlussfolgern, dass der Lichtbogen nach Passieren von Sensor 7 eine starke Verformung der Lichtbogensäule erfuhr, die bis zum Ende der Stromhalbschwingung fortbestand. Dabei wölbte sich der Lichtbogen aus dem Kontaktspalt heraus hin zum Metaldampfschirm. Sein Kathodenfußpunkt folgte für eine kurze Zeit dieser Verformung und wanderte auf die Außenseite der Kathode. Diese Verformung verursachte eine Abweichung der magnetischen Feldverteilung von jener, die im mathematischen Modell vorausgesetzt wurde. Die sich daraus ergebende erhöhte Ungenauigkeit der Positionsauswertung ist an den sich widersprechenden Sensorsignalen in Abbildung 6.23 zu erkennen. Ebenfalls kann dieser Effekt an der sinkenden Anzahl an Übereinstimmungen der von den einzelnen Sensoren vermuteten Positionen identifiziert werden.

7. Messprinzip bedingte Fehlereinflüsse

Unabhängig von der Art der Flussdichtemessung unterliegt die Ausbreitung des Magnetfeldes durch die einzelnen Komponenten einer Vakuumröhre hindurch diversen Einflüssen. Diese wirken sich direkt auf die Aussagekraft der gemessenen Signale des Messsystems aus. In Anbetracht des Aufbaus einer Vakuumröhre spielen zwei Faktoren eine wesentliche Rolle. Zum einen führt die Geometrie des Kontaktsystems zu einer gewollten Beeinflussung des magnetischen Feldes im Kontaktspace. Eine weitere Folge ist die ungewollte Beeinflussung der Verteilung der magnetischen Flussdichte im Außenbereich der Vakuumröhre. Zum anderen führt die Anwesenheit der elektrisch gut leitfähigen Komponenten der Vakuumröhre, wie der Metaldampfschirm und das Kontaktsystem, zu einer Induktion von Wirbelströmen, die ihrerseits wiederum einen dämpfenden Effekt auf das ursprüngliche Magnetfeld ausüben. In diesem Kapitel wird auf diese Einflussfaktoren genauer eingegangen und deren Bedeutung für die Aussagekraft der gewonnenen Messergebnisse erörtert.

7.1. Einfluss der induzierten Wirbelströme auf das magnetische Außenfeld

Dem Induktionsgesetz folgend, hier in seiner Integralform dargestellt, führt eine zeitliche Veränderung des magnetischen Flusses zur Induktion einer elektrischen Wirbelspannung.

$$\oint_C \vec{E} \, ds = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} \, dA \quad (7.1)$$

Durch die Bewegung des kontrahierten Lichtbogens werden die Komponenten einer Vakuumröhre ebenfalls von einem zeitlich veränderlichen, magnetischen Fluss durchsetzt. Entsprechend der elektrischen Leitfähigkeit der einzelnen Komponenten führen die induzierten Wirbelspannungen zur Ausprägung von Wirbelströmen. Das von den Wirbelströmen erzeugte magnetische Feld wirkt der Ursache der Induktion entgegen. Dies ist anhand des negativen Vorzeichens in Gleichung 7.1 zu erkennen. Das ursprüngliche Magnetfeld überlagert sich mit den wirbelstrominduzierten Magnetfeldern zum resultierenden Feld, dessen Flussdichteverteilung im Außenbereich der Röhre gemessen werden kann. Da die Höhe der induzierten Wirbelströme von der Rate der zeitlichen Veränderung des Ursprungsfeldes abhängt, führt ein sich schnell bewegendes Lichtbogen zu einer stärkeren Induktion von Wirbelströmen und somit zu einer geringeren magnetischen Flussdichte an den Sensorpositionen als ein langsamer Lichtbogen. Dieser Effekt wird im weiteren Verlauf als Wirbelstromdämpfung bezeichnet.

7.1.1. Das Simulationsmodell

Um den Einfluss der Wirbelstromdämpfung im Zuge der Positionsbestimmung des Lichtbogens berücksichtigen zu können, ist es notwendig, eine genaue Charakterisierung dieses Effektes vorzunehmen. Das Ziel ist es, eine frequenzabhängige Dämpfungskennlinie für jede Sensorposition zu ermitteln. Diese kann in einem weiteren Schritt als Grundlage zur Erstellung eines aktiven Hochpassfilters dienen, dessen Frequenzgang die Dämpfungskennlinie vollständig kompensiert. Zu diesem Zwecke wurde ein elektromagnetisches Simulationsmodell in der Simulationssoftware COMSOL erstellt. Diese Software dient in der hier angewendeten Form zur Simulation elektromagnetischer Felder auf der Grundlage der Maxwell'schen Feldgleichungen und speziellen Materialgleichungen und bedient sich dazu der Methode der finiten Elemente. Darüber hinaus ist es möglich, an einer beliebigen Stelle des Modells individuelle mathematische Zusammenhänge einzubinden, um so das Modell an eine Vielzahl von physikalischen Eigenschaften anzupassen. Das übliche Vorgehen zur Erstellung eines derartigen Simulationsmodells sieht folgende Schritte vor.

- Erstellen der geometrischen Komponenten und Zusammenhänge des Modells mittels der CAD-Umgebung der Simulationssoftware;

- Definition aller nötigen Materialparameter;
- Definition der Grenzen des Rechengebietes sowie der nötigen Randbedingungen;
- Zerlegung des Rechengebietes und der darin enthaltenen geometrischen Körper in Gitterstrukturen; alle weiteren Berechnungen finden nur noch entlang der Gitterkanten und Knotenpunkte statt;
- Aufstellen und Lösen der entsprechenden mathematischen Gleichungen durch den ausgewählten Solver.

Eine Simulationssoftware, die nach der Methode der finiten Elemente arbeitet, berechnet die entsprechenden Werte nicht für jeden möglichen Punkt im Rechengebiet, sondern durchzieht das Rechengebiet mit einem Gitternetz und führt die Berechnungen nur entlang der Gitterkanten und der Knotenpunkte aus. Je feiner diese Gitterstrukturen gewählt werden, desto detailgetreuer lässt sich ein Körper nachbilden. Im Gegenzug steigt der Rechenaufwand und somit auch die Berechnungszeit des Modells. Die so entstandene Gitterstruktur wird auch als „Netz“ bezeichnet und das Erstellen dieser Struktur als „Netzen“.

Das hier vorliegende Modell sieht eine Bewegung des Lichtbogens während der Simulation vor. Das würde bedeuten, dass sich das Netz während der Simulation verändert und für jeden Zeitschritt neu berechnet werden müsste. Folglich würden die Gitterlinien und Knotenpunkte an neuen Orten entstehen. Da jedoch die im letzten Simulationsschritt gefundenen Lösungen nur an den Orten der Gitterlinien und Knotenpunkten gültig sind, entsteht ohne weiteres Zutun ein Fehler. Dieser führt zu einer Instabilität des Solvers und somit zu einem ergebnislosen Abbruch der Simulation. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird von Seiten der Hersteller von FEM-Software keine Methode angeboten, die das Auftreten dieses Fehlers verhindert. Für geometrisch einfachere Bewegungen, wie Verformungen und Bewegungen von Körpern, die sich frei im Raum befinden, gibt es die Möglichkeit, ein Mesh mit elastischen Gitterlinien und beweglichen Knotenpunkten zu verwenden. Jedoch ist es nicht möglich, die Bewegung des Lichtbogens über die Kontaktfläche damit nachzubilden. Aus diesem Grunde wird in dem hier behandelten Simulationsmodell der Lichtbogen nicht durch einen Körper nachgebildet, sondern durch eine Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit in dem Raum zwischen den beiden Kontakten. Die Stromverteilung stellt sich in diesem Bereich entsprechend der Leitwertverteilung

ein und lässt sich somit gezielt beeinflussen. Auf diese Weise kann jede beliebige Lichtbogenform und Laufbahn nachgebildet werden, ohne das Mesh während der Simulation neu berechnen zu müssen.

Nach dieser Vorgehensweise werden zwei verschiedene Kontaktmodelle eines Spiralkontaktes mit den dazu gehörenden Metaldampfschirmen erstellt. Es handelt sich dabei um die Nachbildung von kommerziellen Vakuumröhren, die in den Kapiteln 8 und 9 als Prüfling zum Einsatz kommen.

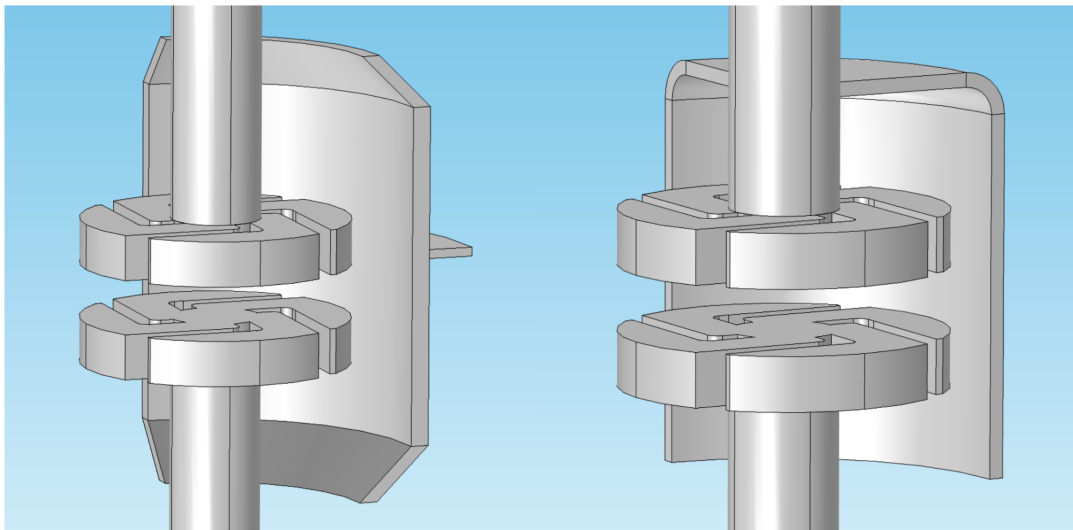


Abbildung 7.1.: Vereinfachte Nachbildungen der Geometrien, die der Simulation zugrunde liegen. Links: 32 mm Spiralkontaktsystem mit Kupferdampfschirm, potentialfrei installiert, [Bra 2014]. Rechts: 45 mm Spiralkontaktsystem mit Edelstahldampfschirm, Potential an oberen Kontakt gebunden [Bra 2014].

Abbildung 7.1 zeigt zwei stark vereinfachte Darstellungen der Nachbildungen der Geometrien. Die in der Simulation tatsächlich verwendeten Geometrien besitzen eine höhere Detailtiefe. Es handelt es sich hierbei in beiden Fällen um Spiralarmkontakte mit einem Durchmesser von 32 mm und 45 mm. Das kleinere Kontaktsystem verfügt über einen Metaldampfschirm aus Kupfer, welcher isoliert ausgeführt und somit keine feste Potentialanbindung zu den Strompfaden besitzt. Das 45-mm-Kontaktsystem verfügt über einen Metaldampfschirm aus Edelstahl, welcher mit dem Kontaktbolzen des Festkontaktes verbunden ist. Dargestellt sind Schnittzeichnungen, um den Blick auf das Kontaktsystem zu ermöglichen. Die Simulation selbst wird mit komplett geschlossenen Metaldampfschirm durchgeführt.

Abbildung 7.2 stellt das Kontaktsystem mit einem Kontaktabstand von 6 mm dar. In dem Bereich zwischen den Spiralkontakten befindet sich ein blau eingefärbtes,

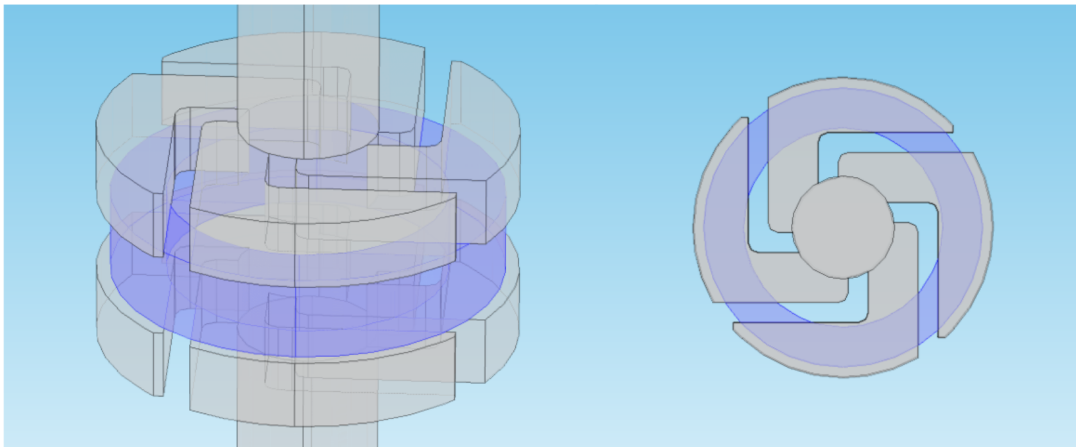


Abbildung 7.2.: Darstellung der Ringzone, welche den Aufenthaltsraum des Lichtbogens definiert [Bra 2014].

ringförmiges Gebiet. In diesem Gebiet ist es möglich, den elektrischen Leitwert orts- und zeitabhängig zu definieren. Im Folgenden wird innerhalb dieses Ringes eine Zone mit einer stark erhöhten elektrischen Leitfähigkeit definiert. In einem weiteren Schritt wird die gesamte Anordnung mit einem Strom beaufschlagt. Daraufhin bildet sich in dem Bereich zwischen den Kontakten eine Stromverteilung aus, die der Leitwertverteilung entspricht. Auf diese Weise lässt sich die Gestalt eines kontrahierten Lichtbogens nachbilden.

Während der Simulationsdauer können die Leitwerte aller Raumpunkte im Ring neu definiert werden. Durch eine Verschiebung der Zone der erhöhten Leitfähigkeit in azimuthaler Richtung bewegt sich ebenfalls die Stromdichte. Auf diese Weise lassen sich leitfähige Raumzonen beliebiger Form definieren, die sich auf beliebige Weise zwischen den Kontaktscheiben bewegen lassen. Da sich bei diesem Vorgehen nur ein Materialparameter verändert, die geometrischen Verhältnisse jedoch gleich bleiben, ist es nicht erforderlich, das Netz während der Simulationsdauer neu zu berechnen. In den hier beschriebenen Simulationen wird der Lichtbogen als eine eingeschnürte, senkrechte Säule nachgebildet. Die Form orientiert sich an Beobachtungen, die unter anderem auch in [Wol 2012] beschrieben werden. Für einen allgemeinen Fall, wie er hier betrachtet werden soll, lässt sich die Form eines kontrahierten, laufenden Lichtbogens demnach als säulenförmig, mit vergrößerten Fußpunkten auf Kathode und Anode annähern. Es wird darauf hingewiesen, dass in dieser Betrachtung nicht auf spezielle Bewegungscharakteristiken des Lichtbogens, wie Sprünge oder Schräglagen eingegangen wird.

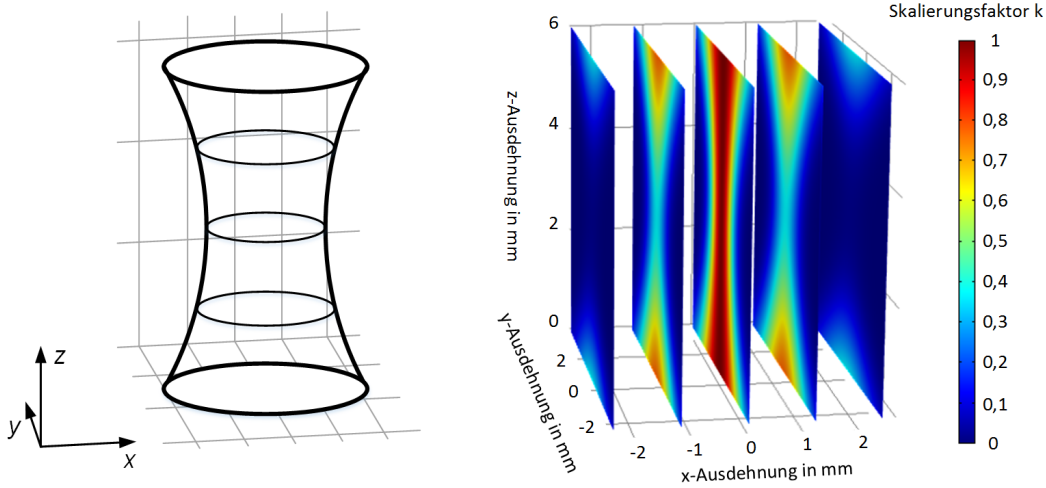


Abbildung 7.3.: Links: Schematische Darstellung der Lichtbogengestalt. Rechts Schnittbilder durch die Leitwertverteilung, die den Lichtbogen repräsentiert [Bra 2014].

Abbildung 7.3 zeigt links schematisch dargestellt die gewählte Form des Lichtbogens. In der rechten Darstellung ist die im Simulationsmodell umgesetzte Leitwertverteilung in mehreren Schnittbildern zu erkennen. Der Lichtbogen hat einen dünnen, gut leitfähigen Kern. Um die entsprechende Leitwertverteilung in radialer Richtung des Lichtbogens zu erhalten, wird der Maximalwert des elektrischen Leitwertes mit einem orts- und zeitabhängigen Faktor multipliziert, der einen Wert zwischen null und eins annehmen kann. Dieser wird mathematisch mit einer zweidimensionalen Gauß-Verteilung in x - und y -Richtung beschrieben. Die hier verwandte Form der Gauß-Verteilung in x -Richtung lautet:

$$gauss(x) = a \cdot \exp\left(-\frac{(x - b)^2}{2 \cdot c^2}\right). \quad (7.2)$$

Der Parameter a gibt die Höhe der Gauß-Verteilung an und wird auf den Wert eins gesetzt. Der Parameter b gibt die Verschiebung auf der x -Achse an und wird auf null gesetzt. Der Parameter c ist die Standardabweichung und stellt in dem hier verwendeten Zusammenhang den Durchmesser des leitfähigen Kerns dar. Er wird auf 0,4 gesetzt. Bezogen auf den gewünschten Lichtbogenradius r_{Libo} ergibt sich

damit folgender Ausdruck:

$$gauss_{rLibo}(x) = \exp\left(-\frac{(x \cdot \frac{2}{r_{Libo}})^2}{0,32}\right). \quad (7.3)$$

Die Einschnürung wird durch Einbeziehung einer Parabelfunktion in z -Richtung erreicht, wobei h den Kontaktabstand darstellt.

$$par(z) = 1 + \left(\frac{2}{h}\right)^2 \cdot \left(z - \frac{h}{2}\right)^2 \quad (7.4)$$

Folglich ergibt sich für den orts- und zeitabhängigen Faktor $k(x, y, z, t)$ folgender Ausdruck:

$$k(x, y, z, t) = \sqrt{gauss_{rLibo}\left(\frac{x(t)}{par(z)}\right) \cdot gauss_{rLibo}\left(\frac{y(t)}{par(z)}\right)}. \quad (7.5)$$

Für eine kreisförmige Bewegung des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche werden $x(t)$ und $y(t)$ folgendermaßen definiert.

$$\omega_{rot} = 2 \cdot \pi \cdot f_{rot} \quad (7.6)$$

$$x(t) = r_{Libo} \cdot \cos(\omega_{rot} \cdot t) \quad (7.7)$$

$$y(t) = r_{Libo} \cdot \sin(\omega_{rot} \cdot t) \quad (7.8)$$

Die Leitfähigkeit des in Abbildung 7.2 dargestellten Ring, der den Aufenthaltsraum und somit auch die Laufbahn des Lichtbogens darstellt, kann in folgender Form dem Simulationsprogramm übergeben werden:

$$\sigma_{Ring} = \sigma_{Libo} \cdot k(x - x_{Libo}(t), y - y_{Libo}(t), z). \quad (7.9)$$

Dabei stehen x , y und z für jeden Punkt im Koordinatensystem, und die Ausdrücke $x - x_{\text{Libo}}(t)$ und $y - y_{\text{Libo}}(t)$ ergeben sich zu null und geben so den Mittelpunkt des Lichtbogens an. Für den Leitwert des Lichtbogens wird der in der Datenbank der Simulationssoftware hinterlegte Wert für Kupfer gewählt. Es gilt $\sigma_{\text{Libo}} = 5,998 \cdot 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}$. Es hat sich gezeigt, dass eine Abweichung dieses Leitwertes um mehr als eine Größenordnung keinen nennenswerten Einfluss auf das Simulationsergebnis ausübt.

7.1.2. Die Simulationsergebnisse

In Tabelle 7.1 sind die durchgeführten Simulationsreihen mit den dazugehörigen Parametern aufgeführt. Bei den Strömen handelt es sich in etwa um die Nennkurschlussströme der Röhrenmodelle, von denen die Kontaktgeometrien entliehen wurden. Der gewählte Kontakthub entspricht einem Wert, bei dem intensive Lichtbogenbewegung während der praktischen Versuche gemessen werden konnte. Für jede der Simulationsreihen wird die Rotationsfrequenz des Lichtbogens von 1 Hz bis 20 kHz variiert. Der maximale Lichtbogendurchmesser am Fußpunkt des Lichtbogens beträgt gemäß Abschnitt 7.1.1 konstant 6 mm.

Tabelle 7.1.: Übersicht der durchgeführten Simulationen mit den dazugehörigen Parametern.

Kontakt-durchmesser	Kontaktgeometrie	Dampfschirm	Stromhöhe (Gleichstrom)	Laufbahn-radius
32 mm	Plattenkontakte	ohne	22,6 kA	13 mm
	Spiralkontakte	ohne	22,63 kA	13 mm
	Spiralkontakte	mit	22,6 kA	13 mm
45 mm	Plattenkontakte	ohne	35,36 kA	18,5 mm
	Spiralkontakte	ohne	35,36 kA	18,5 mm
	Spiralkontakte	mit	35,36 kA	18,5 mm

Das Simulationsmodell berechnet die azimuthal gerichteten magnetischen Flussdichten an den Sensorpositionen des Hall-Sensorsystems, wie es in Kapitel 6 beschrieben ist. Die Amplitude der magnetischen Flussdichte, die bei einer Rotationsfrequenz von 1 Hz ermittelt wurde, gilt für jedes Simulationsmodell als Referenz für den nicht durch Wirbelströme gedämpften Fall. In einem weiteren Schritt werden die Amplituden der Flussdichten aller restlichen Rotationsfrequenzen auf diesen Referenzwert bezogen. Das Ergebnis sind Frequenzverläufe der Amplituden der magnetischen

Flussdichten in Form von Bode-Diagrammen.

Es gilt noch, die unterschiedliche Lage der Sensoren zu berücksichtigen. Abbildung 6.1 zeigt die Lage der acht Hall-Sensoren relativ zur Kontaktgeometrie. Aufgrund der Beeinflussung der Kontaktgeometrie auf die Feldverteilung ist mit einer unterschiedlich ausgeprägten Dämpfung an den einzelnen Sensorpositionen zu rechnen. Die Sensorpositionen teilen sich in zwei Gruppen auf. Die Sensoren mit geradzahliger Nummer befinden sich an den Spiralarmspitzen. Die Sensoren mit ungerader Nummer befinden sich an den Spiralarmflanken. Im weiteren Verlauf werden dafür stellvertretend Sensor 1 und Sensor 2 herangezogen.

Die Abbildungen 7.4 und 7.5 zeigen die Bode-Diagramme der Simulationsergebnisse für das 32-mm-Kontaktsystem und das 45-mm-Kontaktsystem, jeweils mit Metалldampfschirm. Zusätzlich ist eine horizontale, grüne Linie eingezeichnet, die die -3dB-Grenze markiert. Es ist in beiden Fällen ein ausgeprägtes Tiefpassverhalten zu erkennen. Das 32-mm-Kontaktsystem verfügt über einen Metалldampfschirm aus Kupfer. Der elektrische Leitwert des Edelstahldampfschirmes des 45-mm-Kontaktsystems beträgt laut Herstellerangaben [Thy 2014] $\sigma_{\text{Edelstahl}} = 1,33 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ und ist somit um den Faktor 45 kleiner als der des Kupferdampfschirmes. Der geringere Leitwert führt zu einer geringeren Ausprägung der Wirbelströme und reduziert somit den Dämpfungseffekt. Als Resultat weist das 32-mm-Kontaktsystem ein stärkeres Tiefpassverhalten auf. Um die dämpfende Wirkung der Kontaktscheiben und des Dampfschirmes genauer von einander trennen zu können, sind die Bode-Diagramme der beiden Kontaktsysteme, jeweils ohne Dampfschirm, in den Abbildungen A.3 und A.4 dargestellt. Für das 32-mm-Kontaktsystem ist eine massive Verringerung des Tiefpassverhaltens zu erkennen, wohingegen das 45-mm-Kontaktsystem nahezu keine Veränderung aufweist. Dieser Unterschied ist auf die oben erwähnten unterschiedlichen elektrischen Leitwerte der Dampfschirmmaterialien zurückzuführen.

Ohne Dampfschirm wirken sich ausschließlich die Kontaktscheiben auf das Dämpfungsverhalten aus. Eine Schlitzung der Kontaktscheiben, wie sie ein Spiralkontakt aufweist, reduziert die zusammenhängende Fläche und somit die induzierten Wirbelspannungen. Um die Auswirkungen der hier verwendeten Kontaktgeometrie auf das Dämpfungsverhalten der Kontaktscheiben zu identifizieren, sind in den Abbildungen A.1 und A.2 die Simulationsergebnisse von Plattenkontakten mit 32 mm und 45 mm Durchmesser ohne Dampfschirm dargestellt. Zusätzlich zu dem erhöhten Dämpfungsverhalten verglichen mit Spiralkontakten ist zu erkennen, dass ein größe-

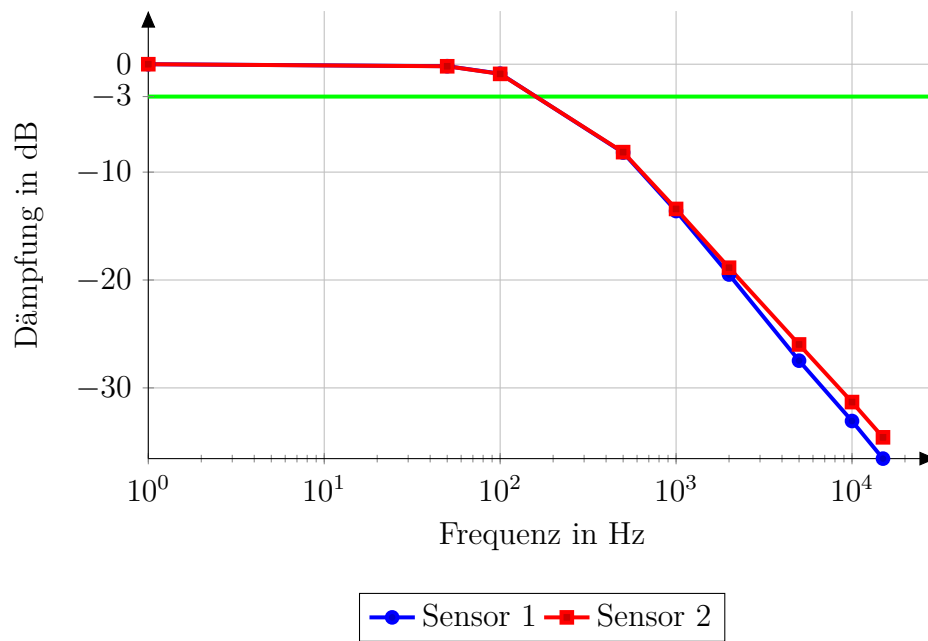


Abbildung 7.4.: 32 mm-Spiralkontakt mit Kupferdampfschirm bei 6 mm Kontaktabstand

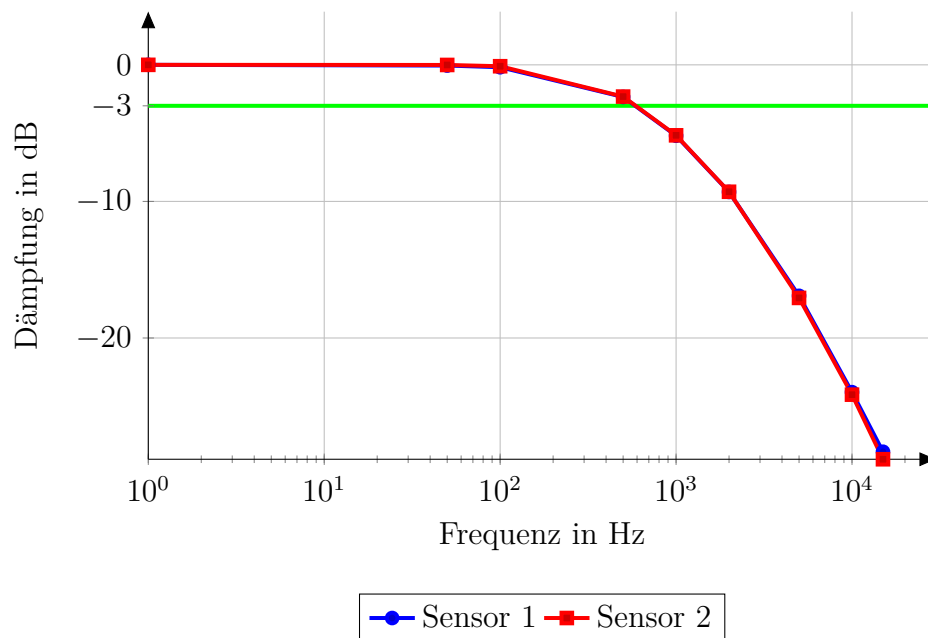


Abbildung 7.5.: 45 mm-Spiralkontakt mit Edelstahldampfschirm bei 6 mm Kontaktabstand

rer Kontaktdurchmesser sich ebenfalls verstärkend auf das Dämpfungsverhalten der Anordnung ausübt. Ein Grund hierfür ist, neben den größeren zusammenhängenden Flächen, die größere Änderungsrate des magnetischen Flusses, bedingt durch den größeren möglichen Bahnradius des Lichtbogens.

Alle bisher betrachteten Simulationen wurden mit einem Kontaktabstand von 6 mm durchgeführt. Abbildung A.5 zeigt einen Vergleich der Simulationsergebnisse des 45-mm-Kontaktsystems mit Dampfschirm einmal mit 6 mm Kontaktabstand und einmal mit 3 mm. Bei dieser Konstellation ist nahezu kein Unterschied zu erkennen. Dennoch kann diese Stichprobe nicht als abschließende Betrachtung gelten. Zur genaueren Positionsbestimmung nach der Look-Up-Methode ist es daher unverzichtbar das Dämpfungsverhalten der Anordnung unter allen möglichen Kontaktabständen zu ermitteln.

7.1.3. Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten

Um die Simulationsergebnisse mit real gewonnenen Messdaten zu vergleichen, werden Hall-Signale von Messungen an beiden Kontaktgeometrien herangezogen. Die zeitlichen Abstände der einzelnen Peaks werden ausgelesen und somit die Frequenz der Lichtbogenrotation bestimmt. Es können Frequenzen in einem Bereich von 200 Hz bis über 30 kHz ermittelt werden. Zusätzlich werden die Spitze-Spitze-Werte der Signale ausgewertet. Diese Werte werden auf den Wert des maximal möglichen Laufbahnradius bezogen und so die Dämpfung in dB bestimmt. In den Abbildungen 7.6 und 7.7 sind die Ergebnisse der Auswertung dargestellt. Zusätzlich sind die Simulationsergebnisse für 32-mm- und 45-mm-Kontakte jeweils mit Dampfschirm und einem Kontaktabstand von 6 mm eingezeichnet.

Eine Frequenzabhängigkeit der Amplituden der Hall-Sensor-Signale ist klar zu erkennen. Ein Vergleich der gemessenen mit den simulierten Werten zeigt, dass die Simulationen beider Kontaktgeometrien in dem Bereich liegen, der von den Messdaten abgedeckt wird. Dennoch weisen die gemessenen Werte im Mittel eine schwächere Dämpfung auf als die Simulationen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die gemessenen Daten aus einem realen Ausschaltversuch stammen. Daher liegen den verglichenen Daten folgende Unterschiede zugrunde:

- Im Gegensatz zur Simulation ist der Strom der realen Messung sinusförmig, was sich direkt auf die Höhe der magnetischen Flussdichte auswirkt. Als Folge

kann man von einer leicht abweichenden Dämpfung ausgehen. Die Simulationen wurden mit dem als zeitlich konstant angenommenen Scheitelwert des Nenn-Kurzschlussausschaltstromes durchgeführt. Somit ist der Strom in der Simulation gleich groß oder größer als während der Messung, dies kann die tendenziell höhere Dämpfung der Simulationsergebnisse erklären.

- Der Kontakthub wird in der Simulation mit 6 mm als konstant vorgegeben. Der reale Ausschaltversuch liegt bei Kontakthubgeschwindigkeiten von 0,7 m/s bis 1,1 m/s. Die ausgelesenen Werte liegen tendenziell bei Kontakthüben unter 6 mm. Dies sollte zu einer stärkeren Dämpfung der gemessenen Werte führen, was sich jedoch nicht erkennen lässt.
- Lichtbogenform sowie Lichtbogenlaufbahn sind in der Realität nicht konstant. Dies kann zu unterschiedlich hohen Spitze-Spitze-Werten der Hall-Sensor-Signale führen, die bei der Berechnung der Dämpfung nicht berücksichtigt werden können. Dies könnte eine Erklärung für die Streuung der gemessenen Werte darstellen.

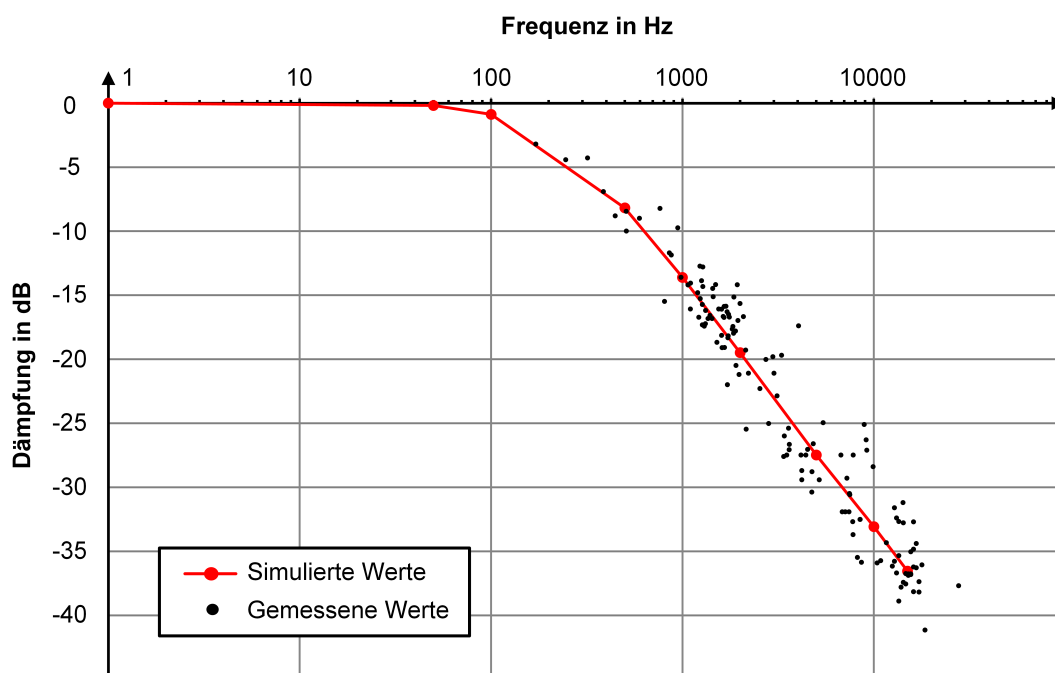


Abbildung 7.6.: Vergleich von gemessenen Werten mit Simulationsergebnissen der Dämpfung des magnetischen Außenfeldes durch die Induktion von Wirbelströmen. Kontaktdurchmesser 32 mm.

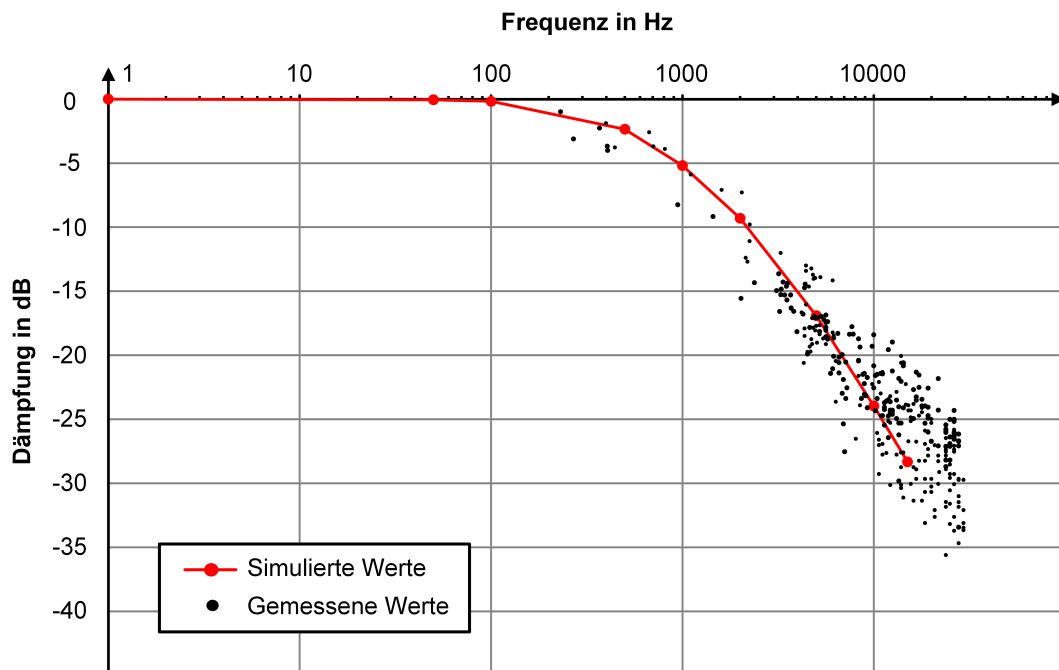


Abbildung 7.7.: Vergleich von gemessenen Werten mit Simulationsergebnissen der Dämpfung des magnetischen Außenfeldes durch die Induktion von Wirbelströmen. Kontaktdurchmesser 45 mm.

Eine weitere Berücksichtigung der oben aufgeführten Punkte zur noch genaueren Simulation der Dämpfung ist aufgrund der Unkenntnis der Lichtbogengestalt sowie des enormen Rechenaufwandes, das mit dem komplexen 3D-Modell verbunden ist, nur bedingt möglich. Dennoch zeigen die erzielten Übereinstimmungen, dass sich die vermuteten Dämpfungseffekte durch induzierte Wirbelströme erklären lassen. Für eine genauere Positionsbestimmung des Lichtbogens muss dieser Effekt also berücksichtigt werden.

7.2. Einfluss der Kontaktgeometrie auf das magnetische Außenfeld

Die gewollte Beeinflussung des magnetischen Feldes zwischen den Kontakten hat ebenfalls Einfluss auf die Ausbreitung des Magnetfeldes im Außenbereich der Vakuumröhre. An dieser Stelle gilt es, den statischen und den dynamischen Fall zu unterscheiden.

Der statische Fall betrachtet die resultierende Flussdichteverteilung jeder einzelnen Position des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche getrennt voneinander. Der dynamische Fall berücksichtigt die Bewegung des Lichtbogens und die sich daraus ergebende Veränderung der Flussdichteverteilung.

Für einen stehenden Lichtbogen ergibt sich entsprechend der Kontaktgeometrie eine konstante Stromdichteverteilung in den Kontaktscheiben. Je nach Position des Lichtbogens weicht diese mehr oder weniger von der Stromverteilung ab, die sich bei einem Plattenkontakt ergeben würde. Da für das mathematische Modell zur Positionsbestimmung Plattenkontakte angenommen wurden, ergeben sich auch hier Abweichungen.

Für einen sich bewegendes Lichtbogen spielt die konkrete Form des Kontaktsystems eine zusätzliche Rolle. Im Gegensatz zu Topfkontakten zwingen Spiralarmkontakte den Lichtbogen pro Umlauf zu mehreren Sprüngen, jeweils von einem Spiralarm zum nächsten. Bei jedem dieser Sprünge ändert sich der Strompfad in den Kontakten, da der Strom von einem Spiralarm zum nächsten kommutiert. Dies hat einen Feldumschlag zur Folge. Die damit verbundenen hohen Änderungsraten des magnetischen Flusses in den Komponenten der Vakuumröhre induzieren ihrerseits wieder Wirbelströme, die sich wiederum auf die Flussdichteverteilung ausüben. Der Feldumschlag ist in seinem Ablauf im wesentlichen von der Art abhängig, wie der Lichtbogen den Sprung von einem Spiralarm zum nächsten vollführt. Dieser Sprung ist Gegenstand einiger wissenschaftlicher Veröffentlichungen und nur sehr schwer zu verallgemeinern. Daher kann es an dieser Stelle nicht das Ziel sein, eine Kompensation der sich ergebenden Effekte anzustreben.

Zur Bestimmung des Einflusses der Kontaktgeometrie im statischen Fall lässt sich das Simulationsmodell, welches in Abschnitt 7.1.1 beschrieben ist, einsetzen. Es werden die 32-mm- sowie die 45-mm-Kontaktgeometrie, jeweils ohne Dampfschirm, untersucht. Die Daten der Laufbahndurchmesser und der Lichtbogengestalt entspre-

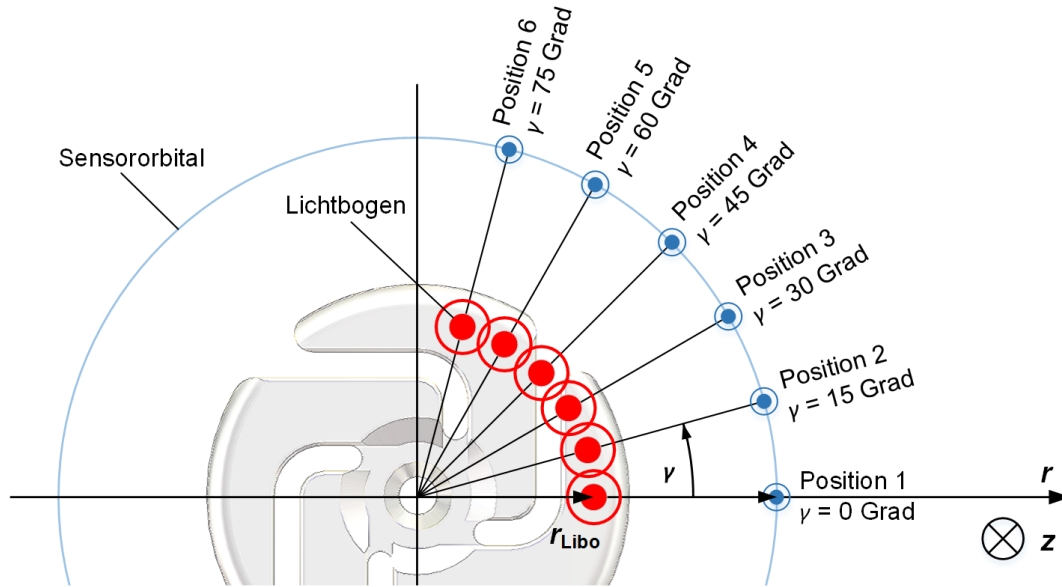


Abbildung 7.8.: Darstellung der 6 Positionen des Lichtbogens sowie der dazu gehörenden Sensorpositionen der Simulation.

chen denen aus Abschnitt 7.1.2. Der Lichtbogen wird in Intervallen von 15 Grad positioniert. Der Sensorpunkt wird auf dem Sensororbital des Hall-Sensor-Systems mit dem Lichtbogen verschoben und besitzt somit den gleichen Raumwinkel wie der Lichtbogen. Der Orbitaldurchmesser beträgt 81 mm. Auf diese Weise ändert sich die relative Lage des Sensorpunktes zum Lichtbogen nicht, jedoch die Lage des Lichtbogens und des Sensors zur Kontaktgeometrie. Abbildung 7.8 verdeutlicht das Vorgehen.

Die Simulationsergebnisse der magnetischen Flussdichte im Sensorpunkt für die Feldanteile in radialer Richtung sowie in z -Richtung für beide Kontaktgeometrien sind in den Abbildungen 7.9 und 7.10 dargestellt. Es ist eine starke Positionsabhängigkeit zu erkennen.

Abbildung 7.11 zeigt die azimuthalen Feldkomponenten für beide Kontaktgeometrien. Aufgrund der geringen Positionsabhängigkeit sind die Werte in Prozent angegeben. Der 100 % Wert entspricht jeweils der identischen Anordnung mit Plattenkontakten. Diese stellen eine neutrale Kontaktgeometrie dar und dienen gleichzeitig als Grundlage der mathematischen Nachbildung beider Messsysteme. Es ist zu erkennen, dass an keiner Position eine Abweichung von mehr als 1,5 % auftritt.

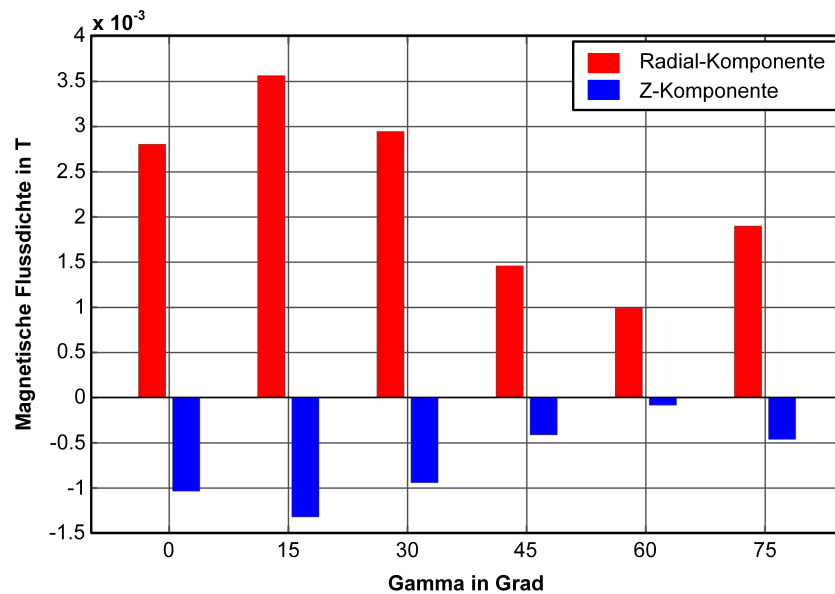


Abbildung 7.9.: Feldkomponenten der magnetischen Flussdichte im Sensorpunkt an 6 verschiedenen Positionen entlang eines Viertelkreises des 32-mm-Spiralkontaktes. Die Stromhöhe beträgt 22,63 kA. Die Lichtbogenpositionen sind in Abbildung 7.8 dargestellt.

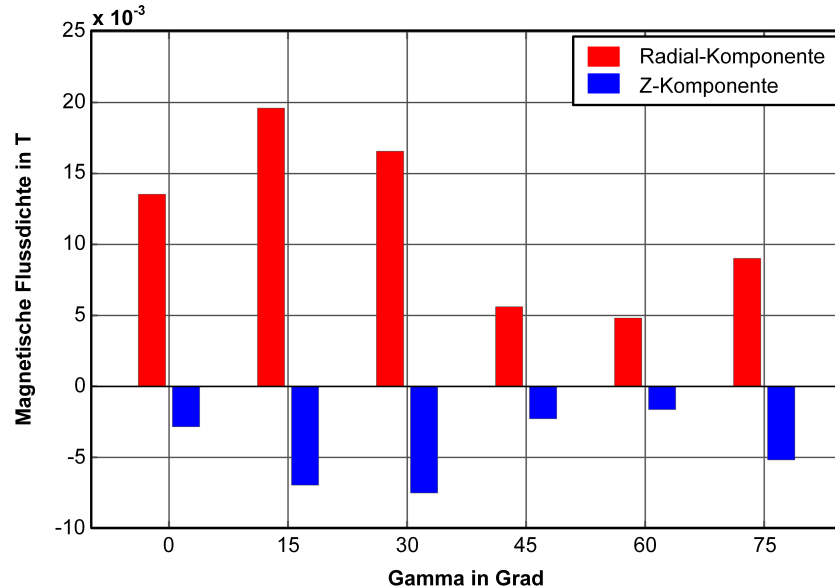


Abbildung 7.10.: Feldkomponenten der magnetischen Flussdichte im Sensorpunkt an 6 verschiedenen Positionen entlang eines Viertelkreises des 45-mm-Spiralkontaktes. Die Stromhöhe beträgt 35,36 kA. Die Lichtbogenpositionen sind in Abbildung 7.8 dargestellt.

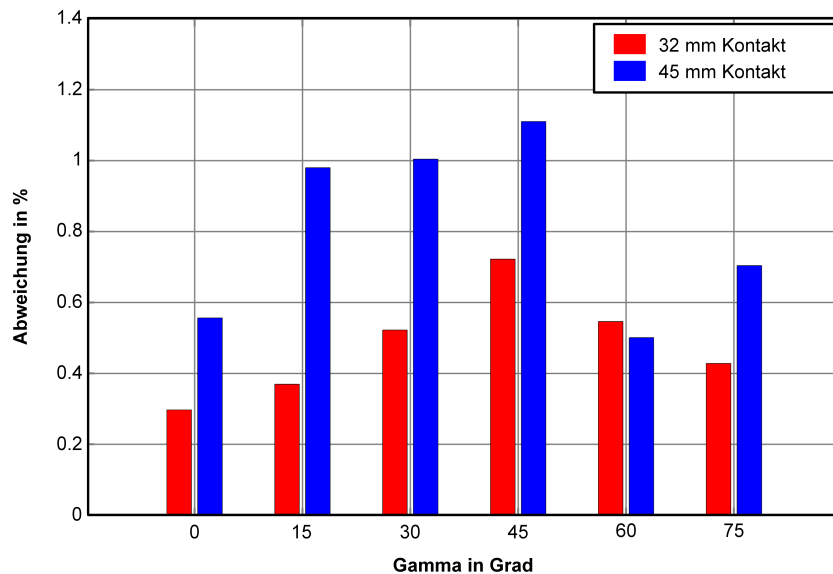


Abbildung 7.11.: Vergleich der azimuthal gerichteten magnetischen Feldkomponenten von einem 32-mm- und einem 45-mm-Spiralkontakt-, mit den Feldkomponenten, welche durch einen Plattenkontakt mit jeweils dem gleichen Durchmesser erzeugt werden. Die 6 verschiedenen Lichtbogenpositionen sind in Abbildung 7.8 dargestellt.

Für das Hall-Sensor basierte Messsystem bedeuten die Simulationsergebnisse eine Bestätigung des ausgewählten Sensormodells, welches eine besonders geringe Beeinflussung durch den „Planar Hall Effekt“ aufweist. Zusätzlich weisen Sie eine sehr stark ausgeprägte Empfindlichkeit in Richtung der Sensornormalen auf, was hier die Richtung der azimuthalen Feldkomponente darstellt. Daher wird an dieser Stelle ein größerer Fehler vermieden.

Für das spulenbasierte Messsystem bedeuten die stark positionsabhängigen Feldkomponenten in radialer Richtung sowie in Z-Richtung eine Verstärkung der in Abschnitt 5.4 beschriebenen Dimensionseffekte, was zu erhöhten Messungenauigkeiten führt. Jedoch liegt der bereits diskutierte Nutzen des Messsystems nicht in der Positionsbestimmung des Lichtbogens. Daher wird das System in keiner Anwendung eingesetzt werden, in der der oben beschriebene Einfluss eine Rolle spielt.

8. Untersuchungen unter Verwendung des Spulen-basierten Messsystems

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt und erläutert, die unter Verwendung des Spulen-basierten Messsystems aus Kapitel 5 durchgeführt wurden. Aufgrund der in Kapitel 5.4 diskutierten Einschränkungen, denen das Spulen-basierte Messsystem unterworfen ist, wird das Messsystem sinnvollerweise ausschließlich eingesetzt, um Lichtbogenbewegung im Inneren von kommerziellen Vakuumleistungsschaltern rein qualitativ zu detektieren.

Während der Durchführung von synthetischen Prüfungen von Vakuumschaltern zur Ermittlung der Leistungsgrenzen treten zwangsläufig zahlreiche Schaltversager auf. Diese werden in der Regel an dem Einbruch der angelegten wiederkehrenden Spannung direkt nach dem Stromnulldurchgang und dem daraus resultierenden Stromfluss durch den Prüfling identifiziert. Zusätzlich wird der Verlauf der Lichtbogen-spannung herangezogen, um Anhaltspunkte über die Lichtbogenerscheinung zu erhalten. Ein Zusammenhang zwischen dem Ausbleiben der Lichtbogenbewegung und einem eventuellen Schaltversager kann auf diese Weise nur sehr begrenzt hergestellt werden. Ebenfalls lassen sich nur bedingt Aussagen über den Verschleißzustand des Kontaktsystems während der Messreihe treffen.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen nutzen das Spulen basierte Messsystem, um diese beiden Aspekte eines Schaltversagens von kommerziellen Vakuumröhren mit Standardkontaktsystemen und modifizierten Kontaktsystemen zu betrachten.

8.1. Gliederung der Messreihen

8.1.1. Untersuchungsobjekte

Als Untersuchungsobjekte dienen zwei unterschiedliche Röhrenmodelle kommerzieller Vakuumleistungsschalter. Es handelt sich dabei um die gleichen Modelle, welche bereits in Kapitel 7 als Geometrie für die durchgeführten Simulationen Verwendung fanden. Abbildung 7.1 zeigt Nachbildungen der Kontaktgeometrien und der Metaldampfschirme. In beiden Fällen handelt es sich um RMF-Spiralkontaktsysteme mit vier Spiralarmlen. Die Kontaktdurchmesser betragen 32 mm und 45 mm. Im Standardzustand sind der bewegliche und der feste Kontakt aneinander ausgerichtet, so dass die Spiralarmlen der beiden Kontakte sich jeweils gegenüberstehen. Diese Ausrichtung ist ebenfalls in Abbildung 7.1 dargestellt und wird im Folgenden als 0-Grad-Variante bezeichnet.

Das durch den auszuschaltenden Strom hervorgerufene, radial gerichtete Magnetfeld hat an den Spiralarmspitzen sein Maximum. Durch Überlagerung der Magnetfeldverteilungen des festen und des beweglichen Kontaktes prägt sich dieses Maximum weiter aus. Die Folge ist eine an dieser Stelle maximal wirkende azimuthal gerichtete Lorenzkraft auf den Lichtbogen. Da sich an dieser Stelle auf beiden Kontakten der Spalt zwischen den benachbarten Spiralarmlen befindet, muss der Lichtbogen beide Spalte gleichzeitig überwinden. Um das Überqueren zu erleichtern, besteht die Möglichkeit, die Kontakte gegeneinander zu verdrehen. Dem Vorteil, dass der Lichtbogen auf diese Weise die Spalte nicht mehr gleichzeitig überwinden muss, steht die Einbuße des ausgeprägten Kraftmaximums gegenüber. Folglich wird die Kräfteverteilung über die Kontaktfläche gleichmäßiger verteilt. Um den Einfluss einer Kontaktverdrehung zu untersuchen, werden beide Standardgeometrien zusätzlich um eine Variante ergänzt, bei denen der bewegliche Kontakt um 45 Grad zu dem Festkontakt verdreht ist. Die Datenbasis ist in Tabelle 8.1 dargestellt.

Tabelle 8.1.: Übersicht der untersuchten Röhrenvarianten.

Kontaktdurchmesser	Verdrehwinkel	Anzahl der untersuchten Röhren
32 mm	0 Grad	9
	45 Grad	4
45 mm	0 Grad	9
	45 Grad	3

8.1.2. Durchgeführte Messreihen

Die durchgeführten Messreihen teilen sich in zwei Gruppen auf. Die 32-mm-Kontaktsysteme werden entlang ihrer Leistungsgrenze getestet. Das bedeutet, dass der Strom und die Lichtbogenzeit schrittweise gesteigert werden, bis ein Schaltversagen eintritt. Daraufhin wird die Lichtbogenzeit schrittweise gesenkt, um die durch den Lichtbogen umgesetzte Ladung zu reduzieren. Dies geschieht, bis ein erfolgreicher Ausschaltprozess möglich ist. Im Anschluss wird der Strom erhöht, um mit der Prozedur von vorne zu beginnen.

Die Leistungsgrenze der 45-mm-Kontaktsysteme ist mit Stromhöhen verbunden, die durch die synthetische Schalterprüfanlage des Fachgebiets nicht bereitgestellt werden können. Daher werden die Messreihen mit diesem Röhrenmodell bei Strömen in der Höhe des Nennkurzschluss-Ausschaltstromes von 25 kA Effektivwert mit Lichtbogenzeiten im Bereich von 8 ms bis 10 ms durchgeführt.

Die durchgeführten Ausschaltungen wurden als synthetische Schaltversuche durchgeführt, die ein Belasten des Prüflings nach dem Stromnulldurchgang mit einer wiederkehrenden Spannung U_{TRV} vorsehen. Die Durchführung dieser Prüfungen orientieren sich an der Norm [IEC 2003] Abschnitt 6.105, in der die Prüfbedingungen sowie die Form der wiederkehrenden Spannung für Schaltgeräte der Mittelspannungsebene definiert sind. Tabelle 8.2 gibt einen Überblick über die relevanten Parameter der durchgeführten synthetischen Prüfungen.

Tabelle 8.2.: Übersicht der Prüfparameter der synthetischen Schalterprüfung.

Parameter	32-mm-Kontaktsystem	45-mm-Kontaktsystem
Nennkurzschluss-Ausschaltstrom	20 kA Effektivwert	25 kA Effektivwert
Nennspannung	12 kV	
Kontakthub	6 mm	
Scheitelwert U_{TRV}	20,6 kV	
Spannungssteilheit U_{TRV}	0,34 kV/ μ s	

8.2. Messergebnisse

8.2.1. Identifikation der Lichtbogenbewegung

Wie bereits in Kapitel 5 ausgeführt, lässt sich die Bewegung des kontrahierten Schaltlichtbogens an einer charakteristischen Oberschwingung der induzierten Spulenspannungen identifizieren. Die beiden hier untersuchten Kontaktdurchmesser zeigen dabei unterschiedlich stark ausgeprägte Oberschwingungen. In den Abbildungen 8.1 und 8.2 sind jeweils eine Spulenspannung während eines erfolgreichen Ausschaltprozesses für ein 32-mm-Kontaktsystem und ein 45-mm-Kontaktsystem mit nicht verdrehten Kontakten dargestellt.

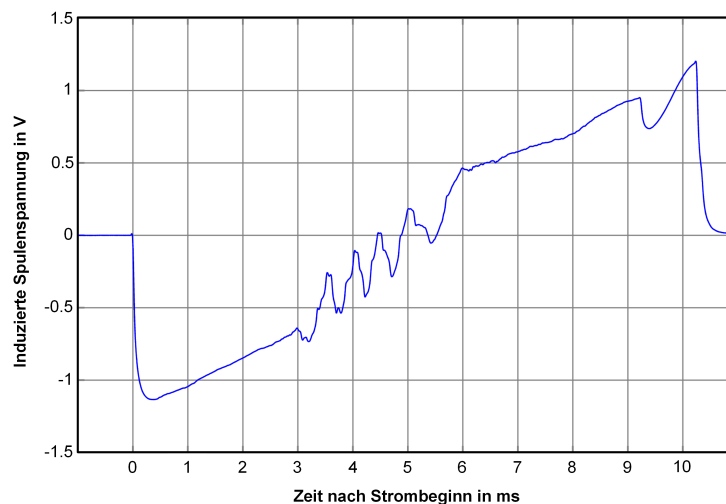


Abbildung 8.1.: Induzierte Spulenspannung des 32-mm-Kontaktsystems ohne Kontaktverdrehung während eines Ausschaltversuchs von 20 kA Effektivwert bei 9,5 ms Lichtbogenzeit.

Es ist zu erkennen, dass die Oberschwingungen des 45-mm-Kontaktsystems eine stärkere Ausprägung zeigen. Ein Grund hierfür kann direkt in dem größeren Kontaktdurchmesser ausgemacht werden. Daraus folgt für den Lichtbogen die Möglichkeit, einem größeren Bahnradius zu folgen, was eine größere Variation der magnetischen Flussdichte in den Sensorspulen verursacht. Die Folge ist eine höhere induzierte Spulenspannung pro Vorbeilauf des Lichtbogens an der Sensorspule.

Unter Berücksichtigung der Fehlereinflüsse, die für dieses Messsystem bereits erläutert wurden, lässt sich die Anzahl der Lichtbogenumläufe auf der Kontaktoberfläche

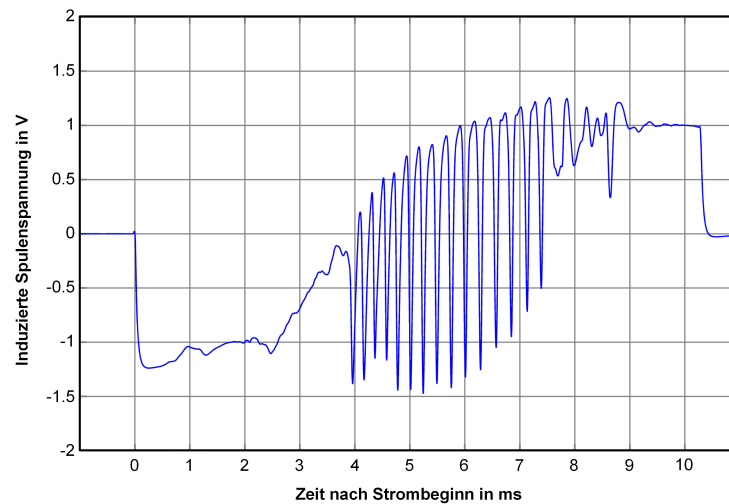


Abbildung 8.2.: Induzierte Spulenspannung des 45-mm-Kontaktsystems ohne Kontaktverdrehung während eines Ausschaltversuchs von 25 kA Effektivwert bei 9,3 ms Lichtbogenzeit.

anhand der Anzahl der charakteristischen Spannungsmaxima abschätzen. Wie bereits beschrieben, ist diese Abschätzung mit erheblichen Fehlereinflüssen verbunden und soll an dieser Stelle nur exemplarisch stattfinden. Es lässt sich qualitativ erkennen, dass das 45-mm-Kontaktsystem eine höhere Anzahl an Lichtbogenumläufen erreicht. Diese Beobachtung deckt sich mit den Messergebnissen, welche später auch mit dem Hall-Sensor basiertem Messsystem durchgeführt wurden.

Eine Verdrehung der Kontakte zeigt in den Spulenspannungen keine Veränderung zu Kontaktsystemen mit nicht verdrehten Kontakten. Ebenfalls ein Vergleich der vier Spulenspannungen miteinander weist auf keine erkennbaren Unterschiede hin.

8.2.2. Lichtbogenbewegung mit zunehmendem Verschleiß

Während jedes Ausschaltversuchs wird Kontaktmaterial von dem Schaltlichtbogen aufgeschmolzen, um an anderer Stelle und in neuer Form wieder zu erstarren. Durch diesen Prozess verändert sich schrittweise die Kontaktgeometrie. Für ein Spiralarmkontaktsystem ist eine Überbrückung der Schlitze zwischen benachbarten Spiralarmen durch wieder erstarrtes Kontaktmaterial besonders kritisch. Ist die Stromtragfähigkeit dieser Überbrückung ausreichend hoch, verliert das Kontaktsystem in diesem Bereich seine Wirkungsweise. Ein laufender Lichtbogen, der diesen Bereich erreicht,

kann zum Stillstand kommen und weitere Erosion verursachen. Aus diesem Grunde spielt die Überbrückbarkeit der Spiralarmschlitzes bei dem Verschleißverhalten solcher Kontaktsysteme eine wichtige Rolle.

In den hier durchgeführten Messreihen zeigt das 32-mm-Kontaktsystem eine Tendenz zu einem deutlichen Verschleißzeitpunkt, ab dem keine Lichtbogenbewegung mehr generiert werden konnte. Der Übergang von einer normalen Lichtbogenbewegung zu keiner erkennbaren Bewegung fand relativ abrupt innerhalb von einer bis zwei Ausschaltungen statt. Eine derart verschlissene Röhre zeigt auch bei weiteren Ausschaltungen keine Lichtbogenbewegung mehr. Eine 45-Grad-Verdrehung der 32-mm-Kontakte zeigt ein ähnlich eindeutiges Verhalten. Dieser eindeutige Verschleißmoment lässt sich auf das oben beschriebene Verschmelzen der Spiralarmkontakte zurückführen. Die Kontaktsysteme zeigten nach einer Öffnung der Röhre im Anschluss an die Messreihen teils großflächige Verschmelzungen der Spiralarms, was diese Vermutung bestätigt. Tabelle 8.3 zeigt einen Überblick der Messergebnisse.

Tabelle 8.3.: Übersicht der identifizierten Verschleißzeitpunkte des 32-mm-Kontaktsystems. Verschleißzeitpunkt: Anzahl der Ausschaltversuche, die den Übergang von einer normalen Lichtbogenbewegung zu keiner erkennbaren Lichtbogenbewegung darstellen. Summenladung: Die Summe der Lichtbogenladungen aller Ausschaltungen mit erfolgreicher Lichtbogenbewegung bis zum Verschleißzeitpunkt.

Verdrehung	Verschleißzeitpunkt	Summenladung	Anzahl der erfolgreichen Ausschaltungen	Stromspanne Messbereich (Effektivwert)
0 Grad	1	1827 As	10	20 kA - 24 kA
	1	1761 As	10	20 kA - 23 kA
	1	1702 As	10	10 kA - 24 kA
	1	1782 As	10	20 kA - 24 kA
	1	1778 As	10	10 kA - 24 kA
	2	1632 As	9	20 kA - 24 kA
	2	1697 As	10	10 kA - 24 kA
	2	1615 As	8	20 kA - 25 kA
	2	1684 As	9	10 kA - 24 kA
45 Grad	1	1674 As	14	18 kA - 22 kA
	1	1658 As	11	20 kA - 25 kA
	1	1497 As	9	16 kA - 21 kA
	2	1796 As	11	15 kA - 22 kA

Zusätzlich sind die erreichten Summenladungen der untersuchten Prüflinge aufgeführt. Dabei handelt es sich um die Summe der Lichtbogenladungen aller Ausschaltungen mit erfolgreicher Lichtbogenbewegung bis zum Erreichen des Verschleißzeitpunktes eines Prüflings. Um ein Beispiel zu geben, wird ein Prüfling angenommen, der zehn erfolgreiche Ausschaltversuche mit jeweils einer Lichtbogenladung von 180 As absolviert. Ab dem elften Ausschaltversuch besteht der Prüfling keinen weiteren Ausschaltversuch und erzeugt nur noch Schaltversager. Für diesen Prüfling ergibt sich somit eine Summenladung von zehn mal 180 As, folglich 1800 As.

Tabelle 8.3 zeigt sich eine eindeutige Grenze der möglichen Summenladung für dieses Kontaktsystem im Bereich von 1700 As bis 1800 As. Eine Verdrehung um 45 Grad wirkt sich offenbar negativ auf die erreichbare Summenladung und somit auf die Lebensdauer aus.

Das Kontaktsystem mit 45 mm Durchmesser zeigt für 0 Grad und 45 Grad Verdrehung keinen eindeutigen Verschleißmoment. Ab Summenladungen von 2000 As treten, teils mehrfach hintereinander, Ausschaltungen ohne erkennbare Lichtbogenbewegung auf. Dieser Zustand wird jedoch bei beiden Verdrehwinkeln mit weiteren Ausschaltvorgängen wieder verlassen, so dass ausgeprägte Lichtbogenbewegungen auch noch bei Summenladungen von 6000 As bis 7000 As beobachtet werden können. Eine Erklärung für dieses Verhalten kann die Kontaktgeometrie liefern. Diese ist identisch mit der des 32-mm-Kontaktsystems, jedoch um den Faktor 1,4 vergrößert. Daher sind ebenfalls auch die Schlitze zwischen den Spiralarms um den Faktor 1,4 breiter. Die geprüften Ströme lagen mit 25 kA Effektivwert im Vergleich zu 20 kA bis 24 kA bei dem 32-mm-System nur wenig höher. Die Kontaktscheiben sind ebenfalls um den Faktor 1,4 dicker, was die Wärmekapazität der Kontaktscheibe erhöht. Die Menge an aufgeschmolzenem Kontaktmaterial reicht offenbar nicht aus, um, wie bei dem 32-mm-Kontaktsystem, nach dem Wiedererstarren eine massive und dauerhafte Überbrückung des Spiralarmschlitzes herzustellen. Vielmehr wachsen die Brücken schrittweise von einer Spiralarmspitze über den Spalt zum benachbarten Spiralarm. Die resultierenden Brücken besitzen durch ihre filigrane Struktur eine geringe Stromtragfähigkeit sowie keine ausreichende Masse, um weitere Ausschaltversuche dauerhaft zu überstehen, ohne durch erneute Aufschmelzungen wieder zerstört zu werden. Das Resultat ist ein uneindeutiger Verschleißmoment, der von zahlreichen Regenerationen der Kontaktgeometrie geprägt ist. Die Betrachtung verschlissener 45 mm Kontakte zeigt schichtartige Ablagerungen erstarrten Kontaktmaterials an den äußeren Kanten der Spiralarms und in den Spiralarmschlitzen. Diese bezeugen das zu-

vor beschriebene schichtweise Wachstum der Überbrückungen. Ein einzelner dieser Wachstumsschritte vermag es demnach nicht alleine, eine dauerhafte Überbrückung zu erzeugen, was eine Regeneration der RMF-Wirkungsweise ermöglicht.

Die Verdrehung der Kontakte hat eine weitere Konsequenz für das Verschleißverhalten. In Abbildung 8.3 sind zwei verschlissene 32-mm-Anoden eines nicht verdrehten und eines um 45 Grad verdrehten Kontaktsystems dargestellt. Die Überbrückungen aller Spiralarmschlitze ist deutlich zu erkennen. Die rechts dargestellte Kontaktscheibe eines verdrehten Kontaktsystems zeigt darüber hinaus eine deutlich unebene Oberfläche, die durch die verdrehte Lage des Gegenkontaktes entstanden ist. Die verdrehte Lage der Spiralarmschlitze des Gegenkontaktes sind gut erkennbar. Das 45-mm-Kontaktsystem zeigt die gleichen Abbranderscheinungen in etwas abgeschwächter Form. Das unebene Abbrandbild der Kontaktoberfläche reduziert die effektive Kontaktfläche im geschlossenen Zustand. Zusätzlich ist eine Reduktion der Kontaktseparation möglich, was sich nachteilig auf die Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke im geöffneten Zustand ausüben kann.



Abbildung 8.3.: Gegenüberstellung zweier verschlissener Kontaktscheiben (Anoden) des 32-mm-Kontaktsystems. Links ohne Verdrehung, rechts mit 45 Grad Verdrehung.

8.2.3. Ausfallverhalten

In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf dem Auftreten von Schaltversagern, die während der oben beschriebenen Messreihen auftreten.

Das 45-mm-Kontaktsystem wird mit vielen nahezu identischen Folgebelastrungen

beaufschlagt, was eine direkte Betrachtung von Lichtbogenbewegung und Ausfallverhalten ermöglicht. Bemerkenswerterweise kann für beide untersuchten Verdrehwinkel kein eindeutiger Zusammenhang erkannt werden. Allgemein zeigt das 45-mm-Kontaktsystem eine ausgeprägte Lichtbogenbewegung. Wie bereits beschrieben, kann die Lichtbogenbewegung für die Dauer von ein bis zwei Schalthandlungen aussetzen, um sich danach wieder zu regenerieren. Das Ausfallverhalten zeigt ein ähnliches Verhalten. Erste vereinzelte Ausfälle setzen ab Summenladungen von 3500 As ein, um sich ab 7000 As zu häufen. Bei diesem Wert ist das Kontaktsystem bereits stark verschlissen, da die vom Hersteller angegebene Lebensdauer mit 30 Schalthandlungen bei Nennkurzschlussausschaltstrom weit überschritten ist. Somit lässt sich dem 45-mm-Kontaktsystem für 0 Grad Verdrehung wie auch 45 Grad Verdrehung ein gutes Ausfallverhalten bescheinigen. Jedoch entziehen sich die Prüflinge auf diese Weise Untersuchungen, die zum Ziel haben, innerhalb einer realistischen Lebensdauer und somit mit einem intakten Kontaktsystem Ausfallerscheinungen zu analysieren. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen einer ausbleibenden Lichtbogenbewegung und einem anschließendem Schaltversager kann nicht beobachtet werden. Eine Betrachtung der Ausschaltversuche vor und nach einem Schaltversager zeigt ebenfalls keinen erkennbaren Zusammenhang.

Das Ausfallverhalten wird in hohem Maße durch die Höhe des auszuschaltenden Stromes beeinflusst. Da die Messreihen des 32-mm-Kontaktsystems entlang der Leistungsgrenze des Kontaktsystems stattfinden, liegt die Stromwerte etwas oberhalb der Nennwerte des Kontaktsystems. Ein Überblick über die Spanne der getesteten Stromhöhen ist in Tabelle 8.3 in der fünften Spalte gegeben. Mit Werten von 20 kA bis 24 kA und langen Lichtbogenzeiten werden somit gezielt Schaltversager provoziert, deren Ursache nicht auf den Verschleiß des Kontaktsystems zurückzuführen sind. Ein einfacher Zusammenhang eines Schaltversagers aufgrund mangelnder Lichtbogenbewegung ist somit für diese Messreihen nicht herzustellen.

Die folgende Betrachtung hat das Ziel, die Ausfallwahrscheinlichkeit des 32-mm-Kontaktsystems mit beiden getesteten Verdrehwinkeln in Abhängigkeit der Lichtbogenladung zu untersuchen, eine Betrachtung, die der Bestimmung der Leistungsgrenze des Kontaktsystems entspricht. Durch Ausschaltungen mit Lichtbogenzeiten von 5 ms bis 10 ms wird das relevante Spektrum der möglichen Lichtbogenladungen, welches mit 50 Hz Strömen bis 24 kA möglich ist, abgedeckt. Diese Ladungsspanne wird in Abschnitte von je 5 As aufgeteilt. Alle durchgeführten Ausschaltversuche werden gemäß den gemessenen Lichtbogenladungen den entsprechenden Abschnit-

ten zugeordnet. Für jeden Abschnitt wird die Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet, indem die Anzahl der zugeordneten Ausfälle durch die Anzahl aller dem Abschnitt zugeordneten Messungen dividiert wird. Abbildung 8.4 zeigt die sich so ergebende Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeiten.

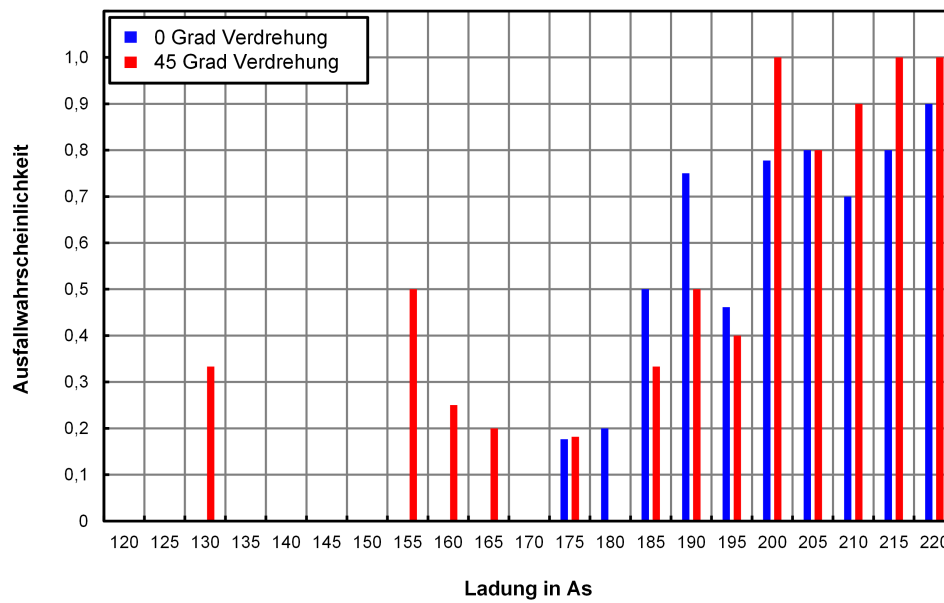


Abbildung 8.4.: Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeiten des 32-mm-Kontaktsystems für 0 Grad und 45 Grad Verdrehung.

Das Messsystem zur Identifikation der Lichtbogenbewegung diente der Detektion des Verschleißmoments, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass keine verschleißbedingten Schaltversager in der Auswertung berücksichtigt wurden. Abbildung 8.4 ist zu entnehmen, dass mit steigender Lichtbogenladung die Wahrscheinlichkeit für einen Schaltversager zunimmt. Das Standardkontaktsystem ohne Verdrehung zeigt einen sicheren Bereich bis zu einer Ladung von 170 As, in dem keine Ausfälle auftreten. Dies entspricht beispielsweise einem Strom von 20 kA eff. mit einer Lichtbogenzeit von 8,5 ms, was nahe der maximal möglichen Lichtbogenladung bei Nennkurzschlussausschaltstrom liegt. Mit steigender Ladung nimmt ab dieser Stelle die Ausfallwahrscheinlichkeit stark zu. Eine Verdrehung des Kontaktsystems um 45 Grad erweist sich auch an dieser Stelle als Nachteil. Es sind schon bei Ladungsmengen zwischen 125 As und 130 As vereinzelt Schaltversager zu verzeichnen. Bemerkenswert ist die ähnliche Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeiten für Ladungen ab 170 As.

9. Untersuchungen unter Verwendung des Hall-Sensor-basierten Messsystems

In diesem Kapitel werden Ergebnisse von Messreihen vorgestellt und erläutert, die unter Verwendung des Hall-Sensor basierten Messsystems durchgeführt wurden, welches in Kapitel 6 beschrieben wird. Bei den Untersuchungsobjekten handelt es sich um die gleichen kommerziellen Vakuumröhren, welche in dem vorangegangenen Kapitel Verwendung fanden, jedoch ausschließlich mit den Standardkontaktsystemen ohne Verdrehung der Kontakte gegeneinander.

9.1. Einteilung der identifizierten Lichtbogenzustände

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, sind Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Lichtbögen in Spezialaufbauten mit Einblickmöglichkeit die am häufigsten eingesetzte Methode zur Untersuchung des Schaltlichtbogens. Auf diese Weise können Lichtbogensgestalt, und je nach Aufbau auch die Lichtbogengeschwindigkeit, ermittelt werden. Um Vergleiche zu ermöglichen, ist es wünschenswert, die genaue Position des Schaltlichtbogens aus den Hall-Sensor-Signalen zu ermitteln. Dann wäre es möglich, genaue Aussagen über die Lichtbogengeschwindigkeit treffen zu können. Die in Kapitel 6.5 beschriebene Methode der Positionsbestimmung mittels Look-Up-Tabellen stellt hierbei eine vielversprechende Möglichkeit dar. Jedoch sind in der dort beschriebenen Form die Dämpfungseffekte der induzierten Wirbelströme nicht berücksichtigt. Wie in Kapitel 7.1 beschrieben, macht sich der dämpfende Einfluss ab einer Rotationsfrequenz von ca. 200 Hz bemerkbar. In einem weiteren Schritt wäre es also sinnvoll, die Simulationsergebnisse zu nutzen, um einen aktiven Hochpassfilter

zu entwerfen, welcher die Wirbelstromdämpfung kompensiert, ohne die Amplituden der niedrigen Frequenzen zu dämpfen. Bevor dieser Schritt nicht durchgeführt werden kann, ist eine Verwendung der Look-Up-Tabellen-Methode für Rotationsfrequenzen über 200 Hz für eine Analyse mit zu großen Fehlern behaftet. Daher ist eine genaue Positionsbestimmung, welche die Grundlage zur Ermittlung der Lichtbogengeschwindigkeit darstellt, zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht möglich. Da es mit Hall-Sensoren nicht möglich ist, die genaue Gestalt des Lichtbogens zu erfassen, ist der direkte Vergleich der hier beschriebenen Messergebnisse mit jenen von Hochgeschwindigkeitskameras ebenfalls nicht durchführbar.

Wie in den Kapiteln 6.3 und 6.6 beschrieben, beinhalten die kompensierten bezogenen magnetischen Flussdichten aber eine Vielzahl von Bewegungsinformationen, die einer direkten Analyse zugänglich sind. Daher werden an dieser Stelle die bezogenen magnetischen Flussdichten herangezogen, um die Messreihen auszuwerten. Das allgemeine Laufverhalten des Lichtbogens während der durchgeführten Messreihen zeigt einige wiederkehrende Merkmale, die in nahezu allen Messungen in ähnlicher Form auftauchen. Diese Zustände werden im Folgenden genauer beschrieben und charakterisiert, um in einem weiteren Schritt für eine Analyse aller durchgeführten Messungen verwendet zu werden.

- **Moment der Kontakttrennung:** Dieses Ereignis macht sich durch eine Knickstelle bemerkbar, welche zeitgleich in allen acht kompensierten Hall-Signalen zu erkennen ist. Zur Detektion der galvanischen Kontakttrennung wird jedoch, wie auch in anderen Laboren üblich, die Lichtbogenspannung herangezogen.
- **Anfangsphase:** In dieser Phase etabliert sich der Lichtbogen. Er durchläuft dabei, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, erst den diffusen Zustand, um dann unter geeigneten Bedingungen eine Kontraktion zu vollziehen. Der genaue Ablauf dieses Prozesses und somit die Dauer der Anfangsphase ist dabei stark von der Stromhöhe und dem Zeitpunkt der Kontakttrennung abhängig. Während dieser Phase verlaufen die kompensierten Hall-Sensor-Signale flach und gleichmäßig. Es ist möglich, dass sich zu diesem Zeitpunkt die Höhen der acht Signale scheinbar widersprechen. So kann es vorkommen, dass zwei sich gegenüberliegende Sensoren eine hohe Flussdichte aufzeichnen. Dies wird als ein diffus brennender Bogen gedeutet. In diesem Fall ist in den Signalen während der Anfangsphase eine Bewegung zu erkennen, die von einer ursprünglich scheinbar

widersprüchlichen Aussage hin einer eindeutigen Aussage führt. Das bedeutet, das sich nur noch in den Signalen von benachbarten Sensoren zeitgleich Maxima zeigen und somit eine eindeutige Aussage über den Aufenthaltsort des Lichtbogens, vor genau diesen Sensoren, getroffen werden kann. Dieser Vorgang wird als Kontraktionsprozess gedeutet und endet mit der eindeutigen Aussage aller acht Sensoren zur Lage des Lichtbogens.

- **Langsame Bewegung:** Im Falle des erfolgreichen Wirkens des Kontaktsystems und der damit verbundenen Lichtbogenbewegung schließt sich der Anfangsphase eine Phase mit langsamer Lichtbogenbewegung an. Der Beginn dieser Phase kann anhand von zwei Indikatoren erkannt werden. Zum einen weisen die kompensierten Hall-Signale derjenigen Sensoren, denen der Lichtbogen in diesem Moment nahe ist, eine Knickstelle auf. Dies lässt auf ein abruptes Anlaufen des Lichtbogens schließen. Ein solcher Anlauf ist in Abbildung 6.7 zum Zeitpunkt 1,8 ms dargestellt. Zum anderen ist in der Folgezeit eine Verlagerung des Signalmaximums von einem Sensor zum nächsten zu verfolgen, wie es auch in Kapitel 6.3 in Abbildung 6.8 ausführlich beschrieben ist. Zur eindeutigen Identifikation eines langsamen Vorbeilaufs eines Lichtbogens an einem Sensor wurde eine Dauer von maximal 2,5 ms definiert. Dies bedeutet, dass die Peakdauer eines Sensorsignals geringer als 2,5 ms sein muss, um als langsamer Vorbeilauf gewertet zu werden. Da auf diese Weise nur ein einzelner Peak zur Rotationsfrequenzbestimmung zur Verfügung steht, wird ein Vergleich mit Abbildung 6.17 herangezogen. Dies ermöglicht die Abschätzung der minimal möglichen Rotationsfrequenz zu ca. 130 Hz. Die minimale erkennbare Frequenz wird zusätzlich durch die maximale Messdauer von 10 ms, in denen der gesamte Schaltvorgang abgehandelt wird, begrenzt. Effektiv verbleiben für die Detektion einer langsamen Bewegung maximal 8 ms bis 9 ms. Die maximal auftretenden Rotationsfrequenzen dieser Phase reichen bis zu 2 kHz.
- **Schnelle Bewegung:** Der Beginn der Phase der schnellen Bewegung ist ebenfalls von einer sprungartigen Beschleunigung des Lichtbogens gekennzeichnet. Einmal beschleunigt, vollführt der Lichtbogen mehrere vollständige Kreisbahnen mit hoher Geschwindigkeit, bevor er diesen Zustand wieder verlässt. Aufgrund der höheren Frequenzen im Vergleich zur langsamen Bewegung gestaltet sich die Identifikation erheblich leichter. In den meisten Fällen geht der Phase der schnellen Bewegung eine langsame Bewegung voraus. Es kann jedoch

vereinzelt auch beobachtet werden, dass der Lichtbogen aus dem Stand in die schnelle Bewegungsphase übergeht. In diesem Bereich sind Frequenzen von 2 kHz bis über 30 kHz zu beobachten, wobei für das 32-mm-Kontaktsystem die Häufigkeit von Frequenzen im Bereich von 2 kHz bis 5 kHz sehr gering ist. Diese liegt in der Größenordnung von unter 10 % im Bezug auf alle durchgeführten Messungen. Für das 45-mm-Kontaktsystem liegt dieser Bereich zwischen 1 kHz und 4 kHz. Dieser Sachverhalt macht den Übergang von der langsamen Bewegung zur schnellen Bewegung eindeutiger identifizierbar, da hier meist der Frequenzbereich von 1 kHz bis 5 kHz übersprungen wird. Abbildung 9.1 verdeutlicht diesen Übergang.

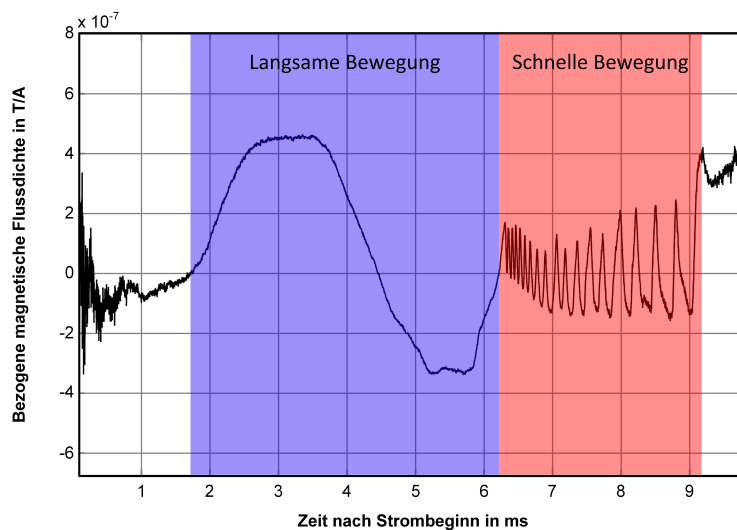


Abbildung 9.1.: Kompensiertes Hall-Sensor-Signal aus Abbildung 6.9 mit zusätzlicher Markierung der identifizierten langsamen und schnellen Bewegung.

- **Mehrere kontrahierte Lichtbögen:** Die Anwesenheit von mehreren Lichtbogensäulen kann in den Signalen der Hall-Sensoren durch eine „widersprüchliche“ Aussage der Sensoren über die Lage des Ursprungs identifiziert werden. Dies steht in der Anfangsphase und im Bereich langsamer Lichtbogenbewegung im Widerspruch zu der dort angewandten Identifikationsmethode, da auch dort Mehrdeutigkeit der Sensorsignale als Indikator dient. Daher ist die Identifikation im Anfangsbereich unmöglich und im Bereich der langsamen Bewegung schwierig. Im Bereich der schnellen Bewegung lösen sich die Widersprüche jedoch auf, und mehrere gleichzeitig existierende Lichtbögen können

anhand von gleichzeitig auftretenden Signalpeaks an unterschiedlichen Sensoren erkannt werden.

9.2. Gliederung der Messreihen

Die Bereiche der langsamen sowie der schnellen Bewegung sind zur Identifikation der Wirkungsweise des RMF-Kontaktsystems von besonderem Interesse. Anhand der oben beschriebenen erkennbaren Merkmale lassen sich die Zeitpunkte vom Beginn und Ende dieser Phasen detektieren. Zusammen mit den Messwerten des Momentanstromes und des Kontakthubes lassen sich die Bedingungen umreißen, die erfüllt sein müssen, um eine entsprechende Lichtbogenbewegung zu ermöglichen. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, weist das Lichtbogenverhalten eine starke Abhängigkeit vom Kontaktmaterial, der Kontaktgeometrie, dem momentanen Kontakthub und dem Dampfschirmpotential auf. Ein zusätzlicher Einflussfaktor bei Untersuchungen an kommerziellen Vakuumröhren resultiert aus deren kompakter Bauform, welche ein erheblich geringeres Vakuumvolumen zur Folge hat, als es bei Spezialaufbauten der Fall ist. Der Einfluss des geringeren Volumens auf die Ladungsträgerdichte und die Metaldampfkonzentration sowie die daraus resultierenden Beeinflussungen der Lichtbogenbewegung ist bisher aufgrund der fehlenden Messtechnik noch weitgehend unbekannt. Kommerzielle Vakuumröhren weisen eine Vielzahl von Kombinationen der oben aufgeführten Einflussfaktoren auf. Entsprechend den in Kapitel 3 umrissenen Zielen werden hier Messreihen definiert, die eine Methode aufzeigen, kommerzielle Vakuumröhren mittels der hier beschriebenen neuen Messmethode zu untersuchen. Dabei werden die Untersuchungsobjekte mit einer möglichst breiten Spanne des Stromes, des Kontakthubes und der Lichtbogenzeit untersucht. Ziel dieses Vorgehen ist es, die wichtigsten Einflussfaktoren auf das Lichtbogenverhalten abzudecken.

Als Untersuchungsobjekte werden auch in diesem Kapitel die Röhrenmodelle verwendet, welche bereits in den vorangegangenen Kapiteln untersucht wurden. Das Modell, welches mit dem 32-mm-Kontaktsystem ausgestattet ist, verfügt über einen Kupfermetaldampfschirm, der ohne festen Potenzialbezug, also „floating“ ausgeführt ist. Da der Schirm von Außen zugänglich ist, ist es möglich, den Schirm mittels einer elektrischen Verbindung, auf das Potential der Anode oder der Kathode zu ziehen. Auf diese Weise kann der Einfluss der Dampfschirmpolarität auf das Lichtbo-

genlaufverhalten an diesem Röhrenmodell untersucht werden. Tabelle 9.1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Messreihen.

Tabelle 9.1.: Übersicht der mit dem Hall-Sensor basiertem Messsystem durchgeführten Messreihen.

Kontaktdurchmesser	Dampfschirmpotential	Stromhöhe (Effektivwert)
32 mm	Floating	16 kA
	Positiv	16 kA
	Negativ	16 kA
45 mm	Positiv	10 kA
	Positiv	16 kA
	Positiv	20 kA
	Positiv	25 kA

Im Zuge der Messreihen werden Lichtbogenzeiten im Bereich von 0 ms bis 10 ms eingestellt, um alle Kombinationen aus Strom und Kontakthub abdecken zu können, die eine einzelne 50-Hz-Stromhalbschwingung ermöglicht. Die mittlere Geschwindigkeit der Kontaktöffnung beträgt bei der 32-mm-Röhre 0,8 m/s und bei der 45-mm-Röhre 1 m/s.

9.3. Messergebnisse

9.3.1. Anlaufbereiche des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche

Durch die Verwendung von acht Sensoren befindet sich ein kontrahierter Lichtbogen zu jedem Zeitpunkt in einem Bereich unmittelbar vor einem Sensor. In diesem Sensornahbereich besitzt der Sensor aufgrund der hohen magnetischen Flussdichte und der Charakteristik der Magnetfeldabnahme mit steigendem Abstand zu seinem Ursprung ein erhöhtes Auflösungsvermögen. Daher ist es möglich, den Ort des Lichtbogenanlaufes mit der Lage vor einem Sensor zu verbinden. Es lässt sich folglich feststellen, vor welchem Sensor der Lichtbogen mit einer langsamen oder schnellen Bewegung begonnen hat. Während aller durchgeführten Messreihen werden die Sensoren immer gleich in Bezug auf die Lage der Spiralarms des Kontaktsystems

positioniert. Die Lage der Sensoren eins bis acht relativ zum Kontaktsystem sind der Abbildung 9.2 zu entnehmen.



Abbildung 9.2.: Darstellung der Lage der acht Hall-Sensoren relativ zu der Lage der Spiralarmspitzen des Kontaktsystems.

Wie bereits in Kapitel 7.1.2 erwähnt, lassen sich die Sensorpositionen in zwei Gruppen einteilen. Alle geradzahligen Sensoren befinden sich an Spiralarmspitzen. Alle ungeradzahligen Sensoren befinden sich an Spiralarmsflanken. Im Folgenden werden alle Messungen ausgewertet, bei denen schnelle oder langsame Lichtbogenbewegungen identifiziert werden konnten. Es wurde identifiziert, vor welchem Sensor der Lichtbogen seinen Bewegungszustand verändert hat, und somit die Startposition einer der beiden Sensorgruppen zugeordnet. Die Anzahl der zugeordneten Lichtbogenanläufe für die 32-mm-Kontaktgeometrie und die 45 mm Kontaktgeometrie sind in Tabelle 9.2 dargestellt.

Tabelle 9.2.: Übersicht über die Anzahl der Startpositionen von langsamen und schnellen Lichtbogenbewegungen.

Kontaktdurchmesser	Sensorgruppe	Langsame Bewegung	Schnelle Bewegung
32 mm	gerade	54	31
	ungerade	35	15
45 mm	gerade	66	58
	ungerade	45	24

Es lässt sich erkennen, dass der Lichtbogen für den Beginn der langsamen wie auch der schnellen Bewegung die Position im Bereich der Spiralarmspitzen bevorzugt. Eine mögliche Erklärung kann die Wirkungsweise des Spiralkontaktes als RMF-Kontaktsystem bieten. Für Lichtbogenpositionen im Bereich der Spiralarmspitzen generieren Spiralkontakte die größten magnetischen Felder in radialer Richtung, was an dieser Stelle eine maximale azimuthal gerichtete Lorentzkraft zur Folge hat.

9.3.2. Beginn und Ende der Lichtbogenbewegung in Abhängigkeit der Stromhöhe und des Kontakthubes

Die weiterführenden Untersuchungen widmen sich der Frage, welche Kombinationen der von außen eingeprägten und somit zugänglichen Faktoren eine Lichtbogenbewegung begünstigen. Zusätzlich wird die Unterscheidung von langsamer und schneller Bewegung beibehalten, und die sich so ergebenden Existenzräume dieser beiden Bewegungszustände miteinander verglichen. Zu diesem Zwecke werden die in Tabelle 9.1 aufgeführten Messreihen auf die Start- und Stopbedingungen für langsame und schnelle Bewegung hin untersucht. Solche Untersuchungen fanden bereits an Einblickröhren statt und wurden unter anderem von Boxman et al. und Schulman et al. in [Box 1977; Sch 1993] beschrieben. Eine Übertragung der Ergebnisse auf kommerzielle Vakuumschalter wurde, wie bereits erwähnt, nicht vorgenommen. Übliche Kontaktsysteme für derartige Untersuchungen weisen Durchmesser von 60 mm und mehr auf. Ein Grund für die Wahl von derart großen Kontaktsystemen liegt in deren Fähigkeit, eine saubere und ausgeprägte Lichtbogenbewegung zu ermöglichen. Die sich so ergebende starke Lichtbogenbewegung kann die Identifikation von Lichtbogenzuständen erheblich erleichtern. Die Resultate dieser Untersuchungen beschreiben Lichtbogenverhalten oder Zustände, die bestimmten Kombinationen von Strom und Kontakthub zugeordnet werden. Diese Zuordnung findet in Strom-Kontakthub-Ebenen statt. Ein so entstandenes Diagramm ist in Abbildung 9.3 dargestellt.

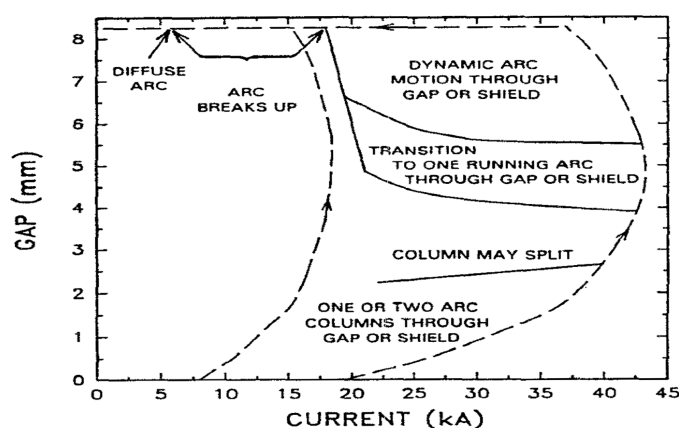


Abbildung 9.3.: Lichtbogenzustandsdiagramm eines CuCr-Spiralarmkontaktsystems mit 62 mm Durchmesser, 1,6 m/s mittlerer Kontaktgeschwindigkeit bei einer 60-Hz-Stromhalbschwingung. [Sch 1993]

Diesem Zustandsdiagramm liegen Untersuchungen zu Grunde, die mit Spiralarmkontaktsystemen mit einem Durchmesser von 62 mm und einer mittleren Kontaktgeschwindigkeit von 1,6 m/s durchgeführt wurden. Von allen veröffentlichten Zustandsdiagrammen kommt dieses daher dem hier verwendeten 45-mm-Kontaktsystem am nächsten, und wird im weiteren Verlauf mit den daran gewonnenen Messergebnissen verglichen.

Je nach Moment der Kontakttrennung und Stromamplitude ergeben sich unterschiedliche Kombinationen von Strom und Kontakthub während des Ausschaltversuches. Die Repräsentation eines Ausschaltversuches auf einem Diagramm, wie es in Abbildung 9.3 dargestellt ist, beginnt mit dem Moment der Kontakttrennung. Ab diesem Moment setzt sich der Verlauf mit wachsendem Kontakthub von unten nach oben fort. Die Auslenkung auf der Abszisse wird durch den Momentanwert des Stromes bestimmt. Da der Strom von außen als Sinushalbwellen eingeprägt wird und der Kontakthub bis zum Erreichen seines Maximalwertes stetig ansteigt, folgt der Verlauf der Paare aus Strom und Kontakthub ebenfalls einem Verlauf, der einer Sinushalbwellen ähnelt.

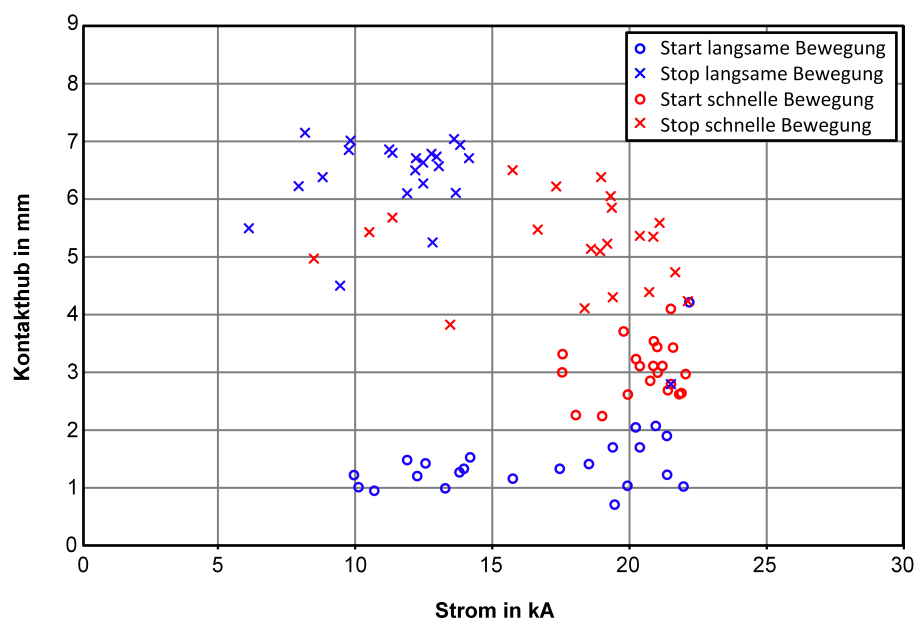


Abbildung 9.4.: Lichtbogenzustandsdiagramm der 32-mm-Kontaktgeometrie mit freiem Dampfschirmpotential, 0,8 m/s mittlerer Kontaktgeschwindigkeit bei Strömen von 16 kA Effektivwert. Eingezeichnet sind die Start- und Endpunkte von langsamer und schneller Lichtbogenbewegung.

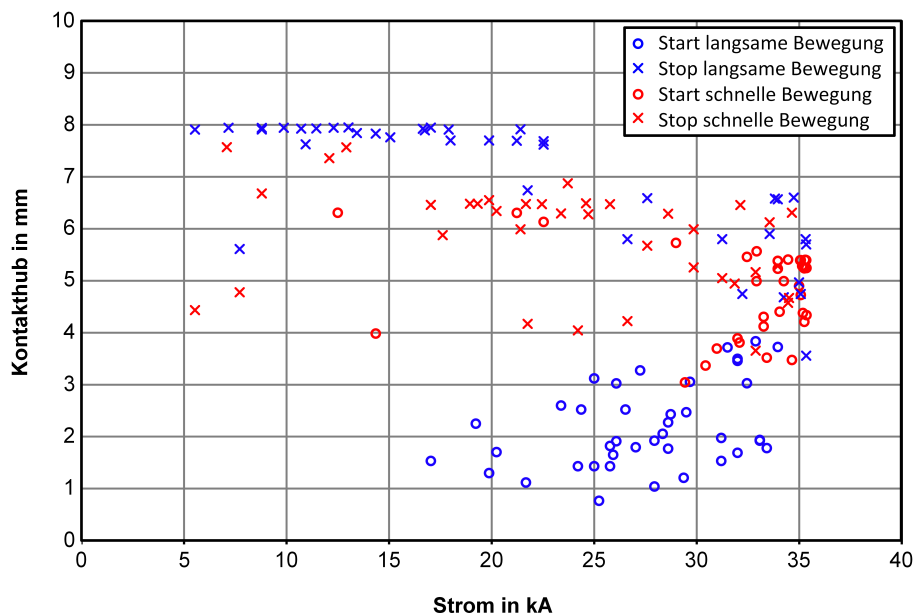


Abbildung 9.5.: Lichtbogenzustandsdiagramm der 45-mm-Kontaktgeometrie bei Strömen von 25 kA Effektivwert, und einer mittleren Kontaktgeschwindigkeit von 1,0 m/s. Eingetragen sind die Start- und Endpunkte von langsamer und schneller Lichtbogenbewegung.

Die Abbildungen 9.4 und 9.5 zeigen die Zustandsdiagramme der Messreihen des 32-mm-Kontaktsystems mit freiem Dampfschirmpotential und Strömen von 16 kA Effektivwert und des 45-mm-Kontaktsystems mit Strömen von 25 kA Effektivwert. Die Start- und Endpunkte für langsame und schnelle Bewegung sind in die Diagramme eingetragen. Es ist zu erkennen, dass sich die Start- und Endpunkte in bestimmten Bereichen häufen. Zwischen diesen Bereichen befindet sich die Zone der Kombinationen aus Strom und Kontakthub, die eine Lichtbogenbewegung für das verwendete Kontaktsystem ermöglichen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass, wie bereits erwähnt, der so entstandene Existenzbereich für Lichtbogenbewegung ebenfalls einer sinusähnlichen Form folgt. Ein derart geformter Bereich ist auch in Abbildung 9.3 an der gestrichelten Umrandung zu erkennen.

Die Zustandsdiagramme der restlichen in Tabelle 9.1 aufgeführten Messreihen sind in den Abbildungen A.7 bis A.10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Bereiche der schnellen Lichtbogenbewegung sich nahezu vollständig als Teilbereiche der langsamen Lichtbogenbewegungen darstellen lassen.

Ein Vergleich der Abbildung 9.4 mit den Abbildungen A.6 und A.7 lässt den Einfluss der Dampfschirmpolarität auf das Lichtbogenverhalten erkennen. Es zeigt sich,

dass ein potentialfreier Dampfschirm den Existenzraum für Lichtbogenbewegung bei diesem Röhrenmodell erheblich vergrößert. In Anbetracht der Absicht eines RMF-Kontaktsystems, den Lichtbogen im kontrahierten Zustand auf der Kontaktoberfläche in eine Bewegung zu versetzen, ist der größere Existenzraum des Röhrenmodells mit freiem Dampfschirmpotential als vorteilhaft zu bewerten.

Ein Vergleich der Abbildung 9.5 mit den Abbildungen A.8 bis A.10 zeigt den positiven Einfluss einer höheren Stromamplitude auf das Wachstum der Existenzräume für langsame und schnelle Bewegung. Es lässt sich an dieser Stelle erkennen, dass Mindestvoraussetzungen zu existieren scheinen, die erreicht werden müssen, um eine Lichtbogenbewegung zu ermöglichen. Diese Mindestvoraussetzungen weisen eine Abhängigkeit von der Stromhöhe auf. Eine naheliegende Erklärung ist die antreibende Lorentzkraft, welche direkt mit der Stromhöhe verbunden ist. Ein minimal notwendiger Kontakthub nimmt mit steigendem Strom von Messreihe zu Messreihe ab. Bei steigendem Kontakthub und konstantem Strom wächst die resultierende Lorentzkraft auf den Lichtbogen. Für den Fall einer minimal notwendigen Kraft würde bei steigendem Strom der notwendige Kontakthub dementsprechend abnehmen. Diese Überlegung wird durch die Messergebnisse bestätigt.

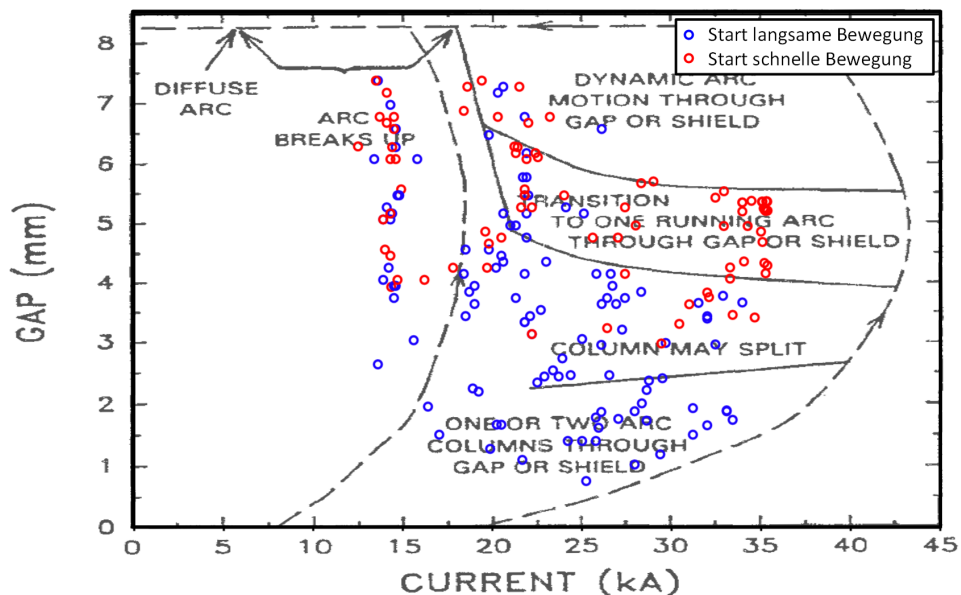


Abbildung 9.6.: Vergleich des Zustandsdiagramms nach Schulman aus Abbildung 9.3 mit den Startpunkten der langsamen und der schnellen Bewegung des 45-mm-Kontaktsystems aus Abbildung 9.5.

Abbildung 9.6 zeigt eine Überlagerung der Abbildung 9.3 und der Startpunkte für langsame und schnelle Bewegung der Messergebnisse des 45-mm-Kontaktsystems. Es ist eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse zu erkennen, bei einer kleinen Abweichung in Richtung kleinerer Stromwerte. Eine Erklärung hierfür kann der Unterschied der verwendeten Kontaktdurchmesser von 45 mm und 62 mm liefern. Der Vergleich der Zustandsdiagramme 9.4 und A.9, welche die Ergebnisse des 32-mm- und des 45-mm-Kontaktsystems bei jeweils 16 kA Effektivwert darstellen, zeigt, dass sich der Existenzraum für Lichtbogenbewegung bei gleicher Stromamplitude mit steigendem Kontaktdurchmesser verkleinert. Größere Spiralkontaktsysteme entfalten demnach ihre volle Wirkungsweise bei entsprechend größeren Stromamplituden. Wird diese Beobachtung auf den Vergleich in Abbildung 9.6 übertragen, so erklärt dies die Verschiebung des Existenzraumes des kleinen 45-mm-Kontaktsystems hin zu kleineren Strömen. Das von Schulman verwendete größere Kontaktsystem wurde bei größeren Stromamplituden getestet. Messungen bei Strömen von 10 kA Effektivwert wurden von Schulman für dieses Diagramm nicht durchgeführt, was die abweichende Lage der Startpunkte im linken Bereich von Abbildung 9.6 erklärt.

9.3.3. Separate Betrachtung von Strom und Kontakthub

Durch den variablen Moment der Kontakttrennung ist eine übersichtliche zweidimensionale Darstellung der Messergebnisse auf die oben beschriebene Weise nicht möglich. Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass nicht alle Kombinationen von Strom und Kontakthub gleichwertig interpretiert werden dürfen. Der Grund liegt im Zusammenspiel des sinusförmigen Stromverlaufs und des variablen Moments der Kontakttrennung. Der Strom besitzt eine steigende und eine fallende Flanke, die bei unterschiedlichen Öffnungsmomenten zu identischen Paaren von Strom und Kontakthub führen können. Die dabei vorherrschenden Bedingungen können aufgrund der Kurvenverläufe vor und nach dem betrachteten Moment jedoch stark unterschiedlich ausfallen. Zusätzlich folgt eine Uneindeutigkeit der Darstellung, wie sie die Zustandsdiagramme darstellen. Darüber hinaus ist es aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten, denen das Lichtbogenverhalten unterworfen ist, vorteilhaft, die genauen Randbedingungen der Start- und Endpunkte der Lichtbogenbewegung zu kennen. Daher werden in diesem Abschnitt die oben beschriebenen Existenzräume für Lichtbogenbewegung genauer strukturiert. Die beschriebene Uneindeutigkeit

lässt sich aufheben, indem Strom und Kontakthub getrennt voneinander betrachtet werden.

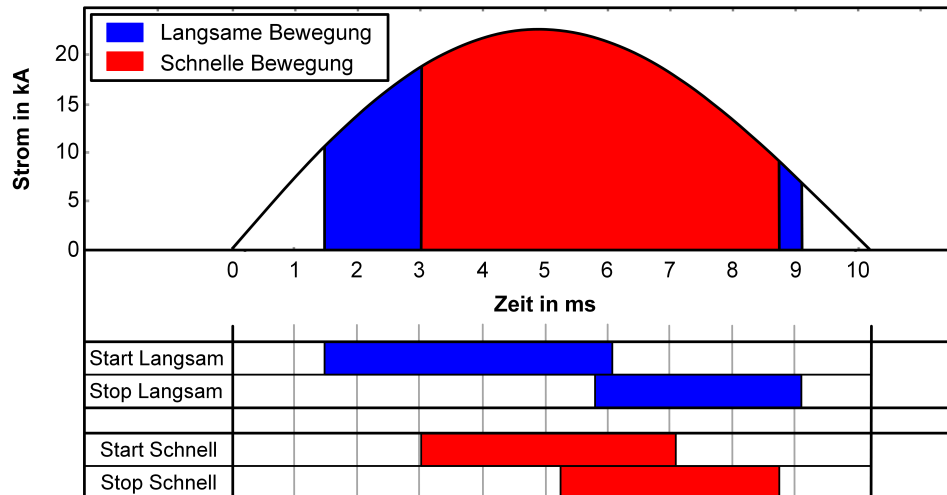


Abbildung 9.7.: Ergebnisse der 32-mm-Kontaktgeometrie bei einer Stromhöhe von 16 kA Effektivwert mit freiem Dampfschirmpotential. Dargestellt sind die Start- und Stopbereiche der langsamen und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf die Stromhalbschwingung bezogen sind.

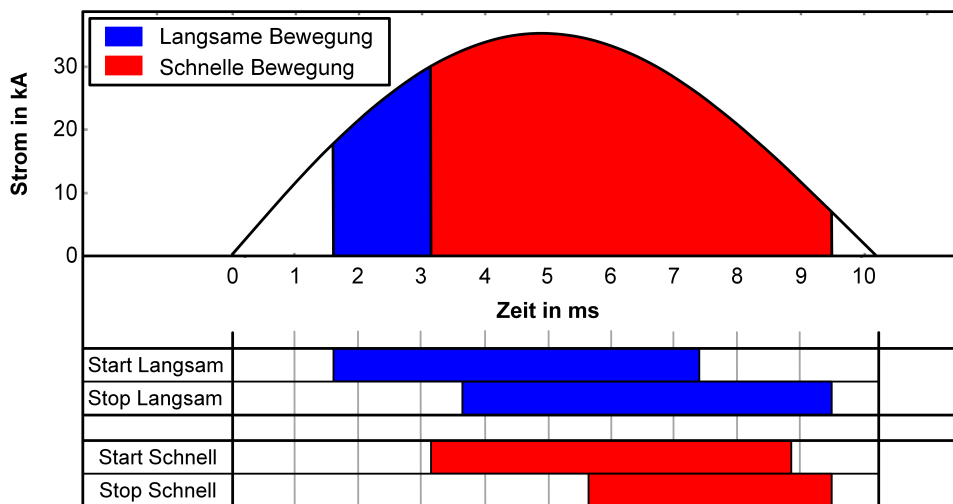


Abbildung 9.8.: Ergebnisse der 45-mm-Kontaktgeometrie bei einer Stromhöhe von 25 kA Effektivwert. Dargestellt sind die Start- und Stopbereiche der langsamen und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf die Stromhalbschwingung bezogen sind.

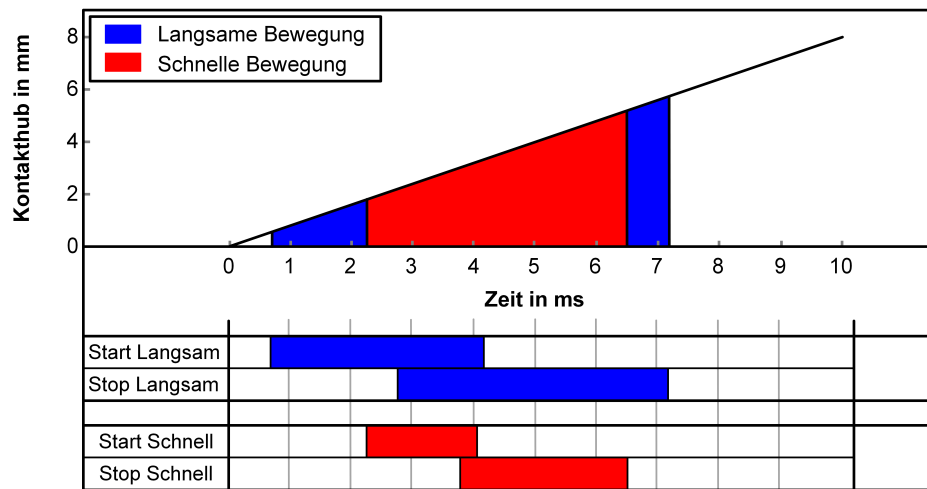


Abbildung 9.9.: Ergebnisse der 32-mm-Kontaktgeometrie bei einer Stromhöhe von 16 kA Effektivwert mit freiem Dampfschirmpotential. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf den Verlauf des Kontaktthubes bezogen sind. Die Öffnungsgeschwindigkeit beträgt 0,8 m/s.

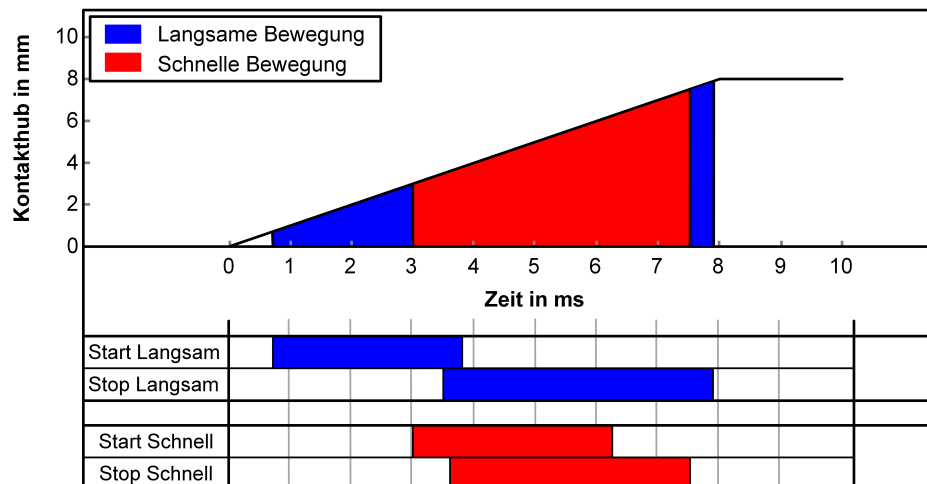


Abbildung 9.10.: Ergebnisse der 45-mm-Kontaktgeometrie bei einer Stromhöhe von 25 kA Effektivwert. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf den Verlauf des Kontaktthubes bezogen sind. Die Öffnungsgeschwindigkeit beträgt 1,0 m/s.

Die Abbildungen 9.7 und 9.8 zeigen die auf die Stromhalbschwingung bezogenen Existenzbereiche der 45-mm-Kontaktgeometrie bei 25 kA und der 32-mm-Kontaktgeometrie bei 16 kA mit freiem Dampfschirmpotential. Zusätzlich sind im unteren Bereich der

Abbildungen die Bereiche gekennzeichnet, in denen eine langsame oder eine schnelle Bewegung begann und endete. Die Darstellungen der restlichen Messreihen aus Tabelle 9.1 sind in den Abbildungen A.11 bis A.15 dargestellt. Zur Vervollständigung der Betrachtung sind in den Abbildungen 9.9 und 9.10 die auf den Kontakthub bezogenen Existenzbereiche dargestellt. Dort sind ebenfalls im unteren Bereich eine genauere Aufteilung in Beginn und Ende der entsprechenden Lichtbogenbewegung eingetragen.

Der Einfluss der festgelegten Dampfschirmpolarität für das 32-mm-Kontaktsystem ist sowohl für positive als auch für negative Polarität von Nachteil für das Lichtbogenlaufverhalten. Trotz der identisch hohen Stromamplituden in allen drei Messreihen, die dem Nennwert des Kurzschlussausschaltstromes des verwendeten Röhrenmodells entspricht, zeigen sich erhebliche Unterschiede. Die Konfigurationen mit einem festen Dampfschirmpotential weisen nur einen begrenzten Existenzbereich für eine ausgeprägte Lichtbogenbewegung auf. Dieser Existenzbereich beschränkt sich auf lange Lichtbogenzeiten von 8,5 ms bis 10 ms. Bei geringeren Lichtbogenzeiten kann kein vollständiger Umlauf des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche mehr beobachtet werden.

Für das 45-mm-Kontaktsystem lassen sich folgende Beobachtungen zusammenfassen.

- Einer schnellen Lichtbogenbewegung geht nahezu immer eine Phase mit langsamer Lichtbogenbewegung voraus.
- Die untere Grenze des nötigen Kontakthubes für langsame Lichtbogenbewegung sinkt mit zunehmenden Strom. Eine Ursache hierfür liegt in den Untersuchungen mit geringer Lichtbogenzeit. Bei diesen fand eine Kontaktöffnung im Bereich des Stromscheitels statt. Die hohen Stromwerte führen zu einer beschleunigten Ausbildung der Lichtbogensäule und ermöglichen einen vorfrühten Anlauf bei kleinen Kontakthüben.
- Der Beginn der schnellen Lichtbogenbewegung zeigt dieses Verhalten nicht. Der minimal notwendige Hub für den Start einer schnellen Lichtbogenbewegung bei kleinen sowie bei größeren Stromamplituden zeigt nur geringe Veränderungen. Dieser Anlaufmoment weist demnach eine höhere Abhängigkeit von

einem minimal notwendigen Hub auf. Den hier vorliegenden Messungen nach liegt dieser Wert für das 45-mm-System zwischen 3 mm und 4 mm.

- Für größere Stromamplituden vergrößern sich die Bereiche der schnellen und langsamen Bewegung. Die untere Grenze weist dabei die Messreihe mit einer Stromamplitude von 10 kA Effektivwert auf. Hier kann nur in einem kurzen Zeitbereich eine zur Kontraktion ausreichende Stromhöhe erreicht werden, was den verkleinerten Existenzbereich der Lichtbogenbewegung in dieser Messreihe erklärt.
- Gegen Ende der Lichtbogenzeit im Bereich kleiner Ströme fallen die unteren Existenzgrenzen für langsame und schnelle Bewegung nahezu zusammen, wobei die Häufigkeiten den hier dargestellten Diagrammen nicht entnommen werden können. Es ist eher selten, dass eine Lichtbogenbewegung unmittelbar aus dem Zustand schneller Bewegung zum Stillstand kommt.

9.3.4. Betrachtung der im Lichtbogen umgesetzten Ladung

Bisher wurden die Momentanwerte des Stromes und des Kontakthubes herangezogen, um den Beginn einer Lichtbogenbewegung zu charakterisieren. Im Unklaren bleibt bei diesem Vorgehen, welche Abhängigkeiten über die Momentanwerte dieser Größen hinaus auf den Anlaufmoment des Lichtbogens existieren. Die verschiedenen Phasen, die ein Lichtbogen durchläuft, bis sich eine kontrahierte Lichtbogensäule ausgebildet hat, welche von einem RMF-Kontaktsystem beschleunigt werden kann, sind in Kapitel 2.2 skizziert. Die umgesetzte Ladung spielt dabei eine wichtige Rolle. Vom Moment der Kontakttrennung bis zum Beginn einer identifizierten Lichtbogenbewegung wird entsprechend dem Stromverlauf eine bestimmte Menge an Ladung durch den Lichtbogen transportiert. Die Analyse dieser Ladungsmenge ermöglicht den Vergleich des Anlaufmomentes von unterschiedlichen Messreihen unter Berücksichtigung der Anfangsphase des Lichtbogens. Es lässt sich somit der Zeitbereich charakterisieren, der zwischen Kontakttrennung und Lichtbogenanlauf liegt.

In den Abbildungen 9.11 bis 9.14 ist eine solche Analyse dargestellt. Für die beiden untersuchten Kontaktsysteme ist jeweils der Startmoment der langsamen und der schnellen Lichtbogengeschwindigkeit unterschieden. Für alle identifizierten Anlaufmomente wird die Ladung berechnet, die vom Moment der Kontakttrennung bis

zur Identifikation der entsprechenden Lichtbogenbewegung durch den Lichtbogen geflossen ist. Das Resultat sind vier Sätze von Ladungsmengen: Zwei für jede Kontaktgeometrie, jeweils für langsame und schnelle Bewegung. Jeder dieser Datensätze wird sortiert und in Gruppen mit einer Spanne von je 10 As eingeordnet. In einem letzten Schritt wird die relative Häufigkeit der Anlaufmomente in jeder dieser Gruppen berechnet, bezogen auf die Anzahl aller Elemente des jeweiligen Datensatzes.

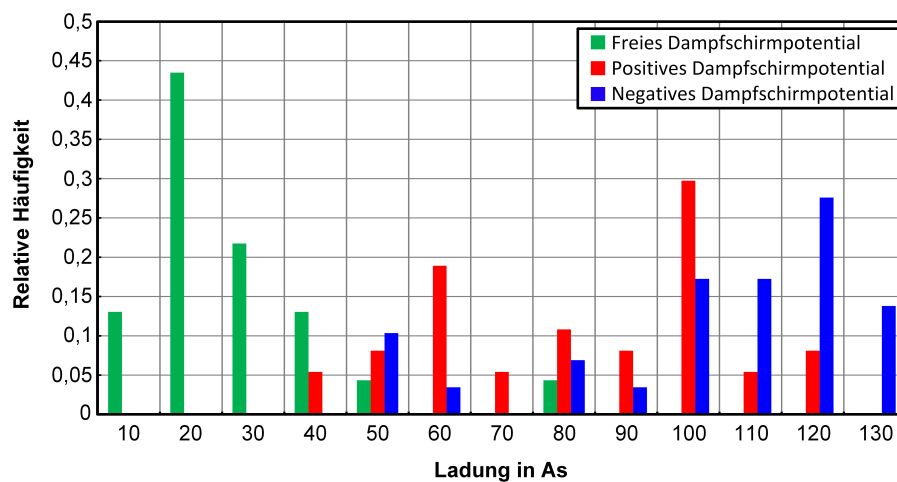


Abbildung 9.11.: Verteilung der relativen Häufigkeit der Lichtbogenladung des 32-mm-Kontaktsystems bis zum Moment des Lichtbogenanlaufs mit langsamer Geschwindigkeit bei einer Stromhöhe von 16 kA Effektivwert.

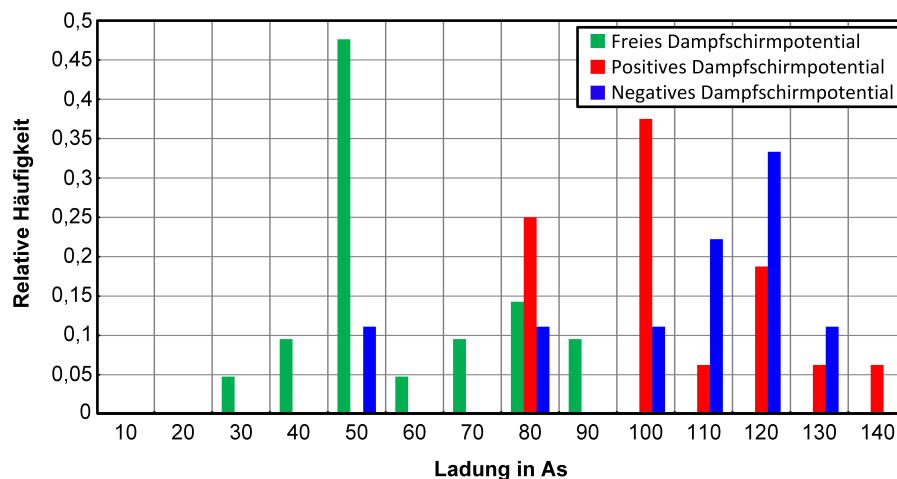


Abbildung 9.12.: Verteilung der relativen Häufigkeit der Lichtbogenladung des 32-mm-Kontaktsystems bis zum Moment des Lichtbogenanlaufs mit schneller Geschwindigkeit bei einer Stromhöhe von 16 kA Effektivwert.

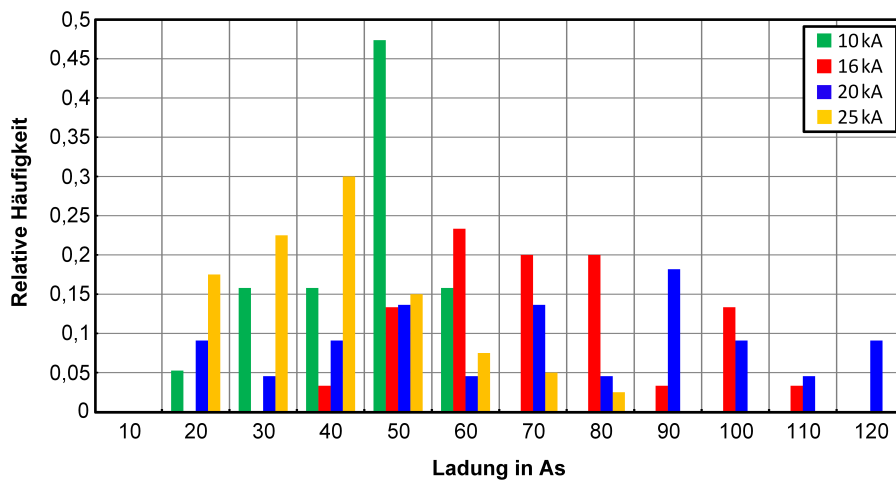


Abbildung 9.13.: Verteilung der relativen Häufigkeit der Lichtbogenladung des 45-mm-Kontaktsystems bis zum Moment des Lichtbogenanlaufs mit langsamer Geschwindigkeit.

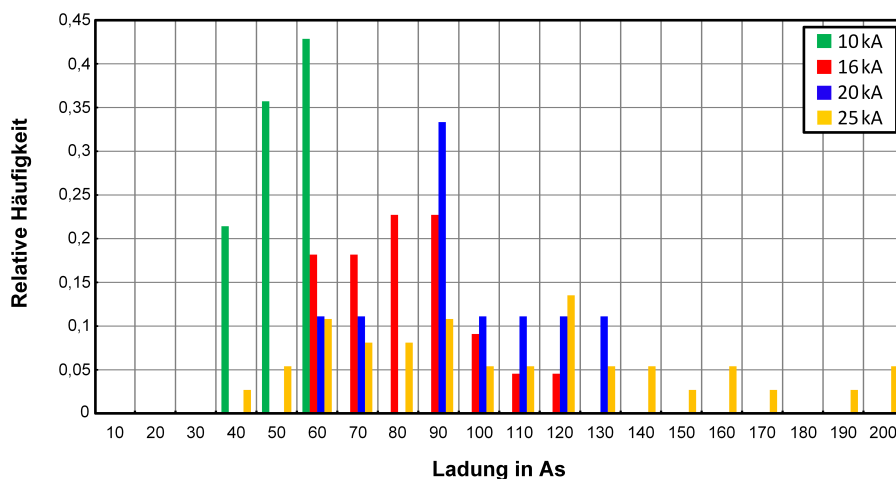


Abbildung 9.14.: Verteilung der relativen Häufigkeit der Lichtbogenladung des 45-mm-Kontaktsystems bis zum Moment des Lichtbogenanlaufs mit schneller Geschwindigkeit.

Zum besseren Verständnis sei hier ein Beispiel zur Deutung von Abbildung 9.11 gegeben. Die Werte der Messreihe des 32-mm-Kontaktsystems mit positivem Dampfschirm sind rot markiert. In einem Ladungsbereich von null bis 10 As findet kein Anlauf des Lichtbogens auf eine langsame Bewegung statt. Das gleiche gilt für die Ladungsbereiche 10 As bis 20 As und 20 As bis 30 As. Im Ladungsbereich von 30 As bis 40 As finden Lichtbogenanläufe auf eine langsame Lichtbogengeschwindigkeit mit einer relativen Häufigkeit von 0,05 statt. Das bedeutet, dass in 5 % aller Messungen,

bei denen langsame Lichtbogenbewegung in dieser Messreihe identifiziert werden konnten, der Lichtbogen nach einer Ladungsmenge von 30 As bis 40 As sich vom Stillstand in langsame Bewegung versetzt hat.

Für das 32-mm-Kontaktsystem lässt sich erneut deutlich erkennen, dass sich ein festes Dampfschirmpotential negativ auf das Anlaufverhalten des Lichtbogens auswirkt. Die Lichtbogenladung bis zu einem Anlauf des Lichtbogens mit langsamer Geschwindigkeit liegt in diesem Fall bei etwa 50 As. Dies ist in Abbildung 9.11 zu erkennen. Bis zu diesem Ladungswert sind bereits 90 % aller Messungen mit einem freien Dampfschirmpotential in den langsamen Bewegungszustand übergegangen. Der Unterschied zwischen positiver und negativer Dampfschirmpolarität erweist sich dagegen als gering. Für den Übergang in den schnellen Bewegungszustand kann aus Abbildung 9.12 das gleiche Verhalten beobachtet werden. Der Anlauf für eine Konstellation mit festem Dampfschirmpotential findet erst nach einer Ladung von 70 As bis 80 As statt. Auch hier finden bis zu diesem Wert 90 % aller Übergänge in den schnellen Bewegungszustand für die Anordnung mit freien Dampfschirmpotential statt.

Für eine Anordnung mit freien Dampfschirmpotential lässt sich erkennen, dass der Anlauf der langsamen und schnellen Lichtbogenbewegung bereits nach geringen Ladungsmengen stattfindet. Der Lichtbogen kann somit bei geringeren Stromwerten und kürzeren Lichtbogenzeiten, was ebenfalls zu kleineren Kontakthüben führt, anlaufen. Das Resultat ist ein größerer Existenzraum des sich bewegenden Lichtbogens. Dies konnte auch in den vorangegangenen Abschnitten beobachtet werden.

Das 45-mm-Kontaktsystem weist für den Anlauf der langsamen Bewegung eine minimal notwendige Ladungsmenge von etwa 10 As bis 20 As auf. Für den Anlauf von schnellen Bewegungen weisen die unterschiedlichen Messreihen einen größeren Unterschied mit einer Spanne von maximal 40 As auf. Dennoch ist auch hier eine minimale Ladungsmenge für die einzelnen Messreihen in Abbildung 9.14 zu erkennen.

Für Ströme von 16 kA Effektivwert weisen die Anlaufmomente beider Bewegungszustände im Vergleich zu den anderen Stromamplituden auffällig erhöhte Werte auf. So ist in beiden Fällen eine erhöhte minimal notwendige Ladung aus den Abbildungen 9.13 und 9.14 zu entnehmen. Ein Vergleich mit den Abbildungen A.14 und A.19

erlaubt die Identifikation des minimal notwendigen Stromes zum Lichtbogenanlauf von 15,6 kA und des minimal notwendigen Kontakthubes von 3,1 mm. Beide Werte fallen im Vergleich zu den Messreihen mit anderen Stromamplituden verhältnismäßig hoch aus.

Die Messreihen mit Stromhöhen von 10 kA, 20 kA und 25 kA Effektivwert weisen für den Anlauf der langsamen Bewegung eine sehr ähnliche Ladungsverteilung auf, wie es in Abbildung 9.13 zu erkennen ist.

Für den Anlauf der schnellen Lichtbogenbewegung ist eine Verschiebung der Häufigkeit in Abbildung 9.14 für Messreihen mit steigenden Strömen zu erkennen. Für 10 kA liegen 100 % der identifizierten Anläufe im Ladungsbereich von 30 As bis 70 As. Für Effektivströme von 16 kA befinden sich 82 % aller identifizierten Anläufe in dem Ladungsbereich von 50 As bis 100 As. Mit steigenden Effektivströmen setzt sich dieser Trend fort. Der Grund hierfür ist die mögliche Maximalladung, die bei konstanten 50 Hz nur durch die Stromamplitude begrenzt wird. Daher verteilen sich alle identifizierten Werte der einzelnen Messreihen auf unterschiedlich große Ladungsintervalle. Bemerkenswert bleibt, dass sich trotz dieser Verschiebung ein minimaler Ladungswert zum Beginn der schnellen Bewegung ablesen lässt, der sich bei allen 4 Stromniveaus ähnelt und im Bereich zwischen 30 As und 60 As liegt.

10. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Messsystem zur Detektion der Schaltlichtbogenbewegung im Inneren von handelsüblichen Vakuumleistungsschaltern der Mittelspannungsebene entwickelt. Der Schwerpunkt lag auf einer möglichst leichten Konstruktion, die an handelsüblichen Schaltgeräten sowie an Experimentalaufbauten zum Einsatz gebracht werden kann. Als Untersuchungsobjekte sowie als Muster für den Entwicklungsprozess dienten zwei handelsübliche Vakuumschaltröhren mit Spiralarmkontaktsystemen unterschiedlicher Durchmesser.

Die vorliegende Arbeit setzt sich aus vier Teilen zusammen:

Im ersten Teil wurde ein bereits bestehendes Messsystem zur Erfassung der Schaltlichtbogenbewegung mittels Sensorspulen auf die Aussagekraft der Messergebnisse hin untersucht. Dieses Messsystem entstand im Jahre 2009 im Rahmen des Vorgängerprojektes der vorliegenden Arbeit im Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt und ist in [Sch 2009] beschrieben. Die mit der Messtechnik verbundenen Fehlereinflüsse wurden analysiert und in einem mathematischen Modell beschrieben.

Im zweiten Teil des Projektes wurde mit Hilfe der gewonnenen Erfahrungen ein neues Messsystem entwickelt, welches durch den Einsatz von Hall-Sensoren die magnetische Flussdichte im Außenbereich der Vakuumröhre direkt misst. Auch hier wurde eine ausführliche mathematische Betrachtung der Funktionsweise durchgeführt, sowie die mit der Messtechnik verbundenen Fehlereinflüsse analysiert, um die Aussagekraft der gemessenen Signale zu bewerten.

Durch die detaillierte Betrachtung des Spulen-basierten-Messsystems und des Hall-Sensor-Messsystems konnten deren Einsatzmöglichkeiten klar identifiziert und gegenübergestellt werden.

Das Spulen-basierte-Messsystem weist eine begrenzte Bandbreite auf. Die im Vergleich zur Dimension der Sensorspulen kompakten Abmessungen der Vakuumröhren führten zu einer Reihe von Fehlereinflüssen, die das Messergebniss unwiederbringlich verfälschen. Die gemessenen Spulenspannungen werden gemäß dem Induktionsgesetz durch eine zeitliche Veränderung des magnetischen Fusses durch die Spulen induziert. Dies geschieht durch Bildung des totalen Differentials des magnetischen Flusses. Das Resultat ist eine uneindeutige Aussage über die Bewegungscharakteristik des Schaltlichtbogens. Der Nutzen des Spulen-basierten-Messsystems liegt aus diesen Gründen hauptsächlich in der Identifikation von Lichtbogenbewegung, ohne weitere Aussagen über dessen Bewegungscharakteristik zuzulassen.

Das auf Hall-Sensoren basierte Messsystem weist aufgrund der höheren Bandbreite und der direkt gemessenen magnetischen Flussdichte einen direkteren Zugang zu der im Signal befindlichen Bewegungsinformation des Lichtbogens auf.

Tabelle 10.1 zeigt diese Gegenüberstellung der beiden Messsysteme. Es ist klar zu erkennen, dass der Einsatz von Hall-Sensoren den Nutzen des Messsystems stark erweitert und somit einen erheblichen Mehrwert darstellt.

Tabelle 10.1.: Gegenüberstellung der Einsatzmöglichkeiten des Spulen-basierten-Messsystems und des Hall-Sensor-Messsystems.

Identifizierbarer Aspekt	Messsystem	
	Spulen-basiert	Hall-Sensor-basiert
Lichtbogenkontraktion	Nein	Ja
Beginn der Lichtbogenbewegung	Ja keine weitere Unterscheidung möglich	Ja Beginn von langsamer und schneller Bewegung
Ende der Lichtbogenbewegung	Ja keine weitere Unterscheidung möglich	Ja Ende von langsamer und schneller Bewegung
Art der Lichtbogenbewegung	Keine Unterscheidung möglich	Ja langsame und schnelle Bewegung
Mehrere kontrahierte Lichtbögen	Nein	Ja

Aufgrund des höheren Informationsgehaltes der Hall-Sensor-Signale wurde, auf der

Grundlage der mathematischen Beschreibung des Messsystems, eine Methode entwickelt, die eine Berechnung der tatsächlichen Lichtbogenposition im Inneren der Vakuumröhre ermöglichen soll. Diese Methode greift auf zuvor berechnete Look-Up-Tabellen zurück und ermöglicht somit eine mathematisch stabile Analyse von Messergebnissen, die mit geringem Rechenaufwand direkt im Anschluss an jede Messung noch direkt im Labor vorgenommen werden kann.

Der dritte Teil des Projektes befasste sich mit den Fehlereinflüssen, welche durch das Messprinzip selbst hervorgerufen werden und unabhängig von der eingesetzten Messtechnik sind. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches es ermöglicht, die Bewegung des Schaltlichtbogens und die sich daraus ergebenden Magnetfeldveränderungen im Außenbereich der Vakuumröhre zu simulieren. Auf diese Weise war es möglich, die Einflüsse der Kontaktgeometrie auf das Wirken des Messsystems zu ermitteln und den so entstandenen Fehler abschätzen zu können. Zusätzlich wurde die dämpfende Wirkung der in den Metaldampfschirm und den Kontaktscheiben induzierten Wirbelströme auf die Magnetfeldverteilung simuliert. In einem weiteren Schritt wurde der Frequenzgang dieser Wirbelstromdämpfung für die beiden untersuchten Prüflinge ermittelt.

Im vierten Teil des Projektes wurden die beiden Messsysteme entsprechend der zuvor ermittelten Einsatzmöglichkeiten bei praktischen Messungen zum Einsatz gebracht. Es wurden Ausschaltversuche von sinusförmigen 50-Hz-Strömen in einer synthetischen Schalterprüfanlage durchgeführt. Die während der Entwicklung als Muster verwendeten sowie den Simulationen zugrundeliegenden beiden handelsüblichen Röhrenmodelle dienten als Prüflinge. Es wurden die Leistungsfähigkeit sowie die Verschleißgrenzen der Prüflinge mit Standardkontakten und modifizierten Kontakten untersucht. Zusätzlich wurde das Bewegungsverhalten des Schaltlichtbogens mit dem ermittelten Ausfallverhalten der Prüflinge verglichen.

Mit Hilfe des Spulen-basierten-Messsystems wurde das Verschleißverhalten der Spiralkontaktsysteme der beiden Prüflingsvarianten untersucht, die sich im Wesentlichen durch ihre Kontaktdurchmesser von 32 mm und 45 mm unterschieden. Das Verschleißverhalten der kleinen Spiralkontakte für Ausschaltströme im Bereich von 130 % des Nennkurzschlussausschaltstromes weist einen abrupten Verschleißzeitpunkt auf, der durch ein dauerhaftes Verschweißen von mindestens zwei der vier

Spiralarne verursacht wird. Dieser Verschleißzeitpunkt zeigt sich für Standardkontaktsysteme in einem schmalen Band der bis dahin aufsummierten Lichtbogenladungen aller Ausschaltungen des jeweiligen Prüflings. Eine Verdrehung der Spiralarne gegeneinander um 45 Grad führt zu einer ähnlich langen Lebensdauer, bis der Verschleißzeitpunkt erreicht wird. Die maximal mögliche Höhe des Ausschaltstroms wird jedoch reduziert. Ebenfalls ist mit vereinzelt Schaltversagern auch bei noch nicht verschlissenen Kontakten zu rechnen. Die schrittweise Deformation der Kontaktgeometrie, welche durch den Kontaktabbrand hervorgerufen wird, weist gegenüber nicht verdrehten Kontakten eine ungleichmäßigere Oberfläche und somit stärkere Geometrieänderungen auf.

Mit Hilfe des Hall-Sensor basierten Messsystems war es möglich, mehrere unterschiedliche Bewegungszustände des Schaltlichtbogens zu identifizieren. Diese Zustände wurden wie folgt aufgeteilt: Anfangsphase, langsame Bewegung, schnelle Bewegung und mehrere kontrahierte Lichtbögen. Der Zustand der langsamen Bewegung ist gekennzeichnet durch Rotationsfrequenzen des Lichtbogens auf der Kontaktoberfläche bis zu 2 kHz. Der Übergang zu höheren Lichtbogengeschwindigkeiten und somit höheren Rotationsfrequenzen ist durch eine abrupte, sprunghafte Beschleunigung gekennzeichnet. Der übersprungene Frequenzbereich liegt für das 32-mm-Kontaktsystem zwischen 2 kHz bis etwa 5 kHz und für das 45-mm-Kontaktsystem zwischen 1 kHz bis etwa 4 kHz. Weniger als 10 % aller gemessenen Lichtbogenbewegungen weisen Rotationsfrequenzen auf, die in diesen beiden „übersprungenen“ Frequenzbereichen liegen. Die Kombination dieser „übersprungenen“ Frequenzbereiche zusammen mit dem abrupten Auftreten des Frequenzsprunges ermöglichte eine saubere Trennung der Zustände der langsamen und der schnellen Lichtbogenbewegung. Es konnten die Bedingungen identifiziert werden, die erfüllt sein müssen, um den Schaltlichtbogen im Inneren der beiden untersuchten Prüflinge in einen dieser beiden Bewegungszustände zu versetzen und zu halten. Das Zusammenspiel von Stromhöhe und Kontakthub während der Schalthandlung wurde dabei berücksichtigt. So konnte ein nötiger Mindesthub identifiziert werden, der wiederum eine Abhängigkeit von der Stromamplitude des zu unterbrechenden Stromes aufweist. Das Ergebnis kann als Existenzraum der Lichtbogenbewegungsformen bezeichnet werden. Ein Vergleich der ermittelten Existenzräume mit den Untersuchungsergebnissen eines vergleichbaren Kontaktsystems unter Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera zeigt eine

weitgehende Übereinstimmung.

In einem weiteren Schritt wurde die nötige Lichtbogenladung betrachtet, die erreicht werden muss, um eine langsame oder schnelle Bewegung zu ermöglichen. Es zeigte sich, dass zum Erreichen des Zustandes der langsamen Bewegung eine Lichtbogenladung im Bereich von 10 As bis 20 As erreicht werden muss. Das Erreichen der schnellen Lichtbogenbewegung beginnt erst ab Werten, die etwa um den Faktor 3 größer sind.

Ein festes Potential des Metaldampfschirmes des Prüflings mit 32-mm-Kontaktsystem zeigte im Vergleich zu einem Dampfschirm ohne festes Potential einen negativen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Lichtbogens. Für den Anlauf mit langsamer Geschwindigkeit sind Lichtbogenladungen notwendig, die um den Faktor 4 bis 5 größer sind als bei einem freien Dampfschirmpotential. Für den Anlauf mit schneller Lichtbogenbewegung liegt der Faktor zwischen zwei und drei.

Es war möglich, für langsame Lichtbogenbewegungen die Position des kontrahierten Schaltlichtbogens während der Schalthandlung auf der Kontaktoberfläche zu verfolgen. Für Rotationsfrequenzen von mehr als 150 Hz wird das magnetische Feld im Außenbereich der Vakuumröhre je nach ihrem Aufbau durch induzierte Wirbelströme in elektrisch leitenden Baugruppen gedämpft. Die Folge ist eine Fehlinterpretation der Positionsbestimmung mit dem hier entwickelten System. Dieses Dämpfungsverhalten der hier untersuchten Prüflinge wurde mittels des oben erwähnten Simulationsmodells für feste Kontaktabstände bestimmt. Ein Vergleich der frequenzabhängigen Dämpfung der Hall-Signale mit den Simulationsergebnissen der Wirbelstromdämpfung zeigt eine gute Übereinstimmung.

Die Ergebnisse der durchgeführten Messreihen zeigen, dass es im Vergleich zu Untersuchungen mit Einblickröhren mit Hilfe von Hall-Sensoren möglich ist, mit relativ geringem technischen Aufwand die Bewegungscharakteristik von Schaltlichtbogen zu untersuchen. Der Vergleich der erzielten Existenzräume für Lichtbogenbewegung zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Schulman, welche mit Hochgeschwindigkeitskameras erzielt wurden. Daher lässt sich festhalten, dass die hier vorgestellte Messmethode eine nützliche Ergänzung darstellt, um die Bewegungscharakteristik von Schaltlichtbögen in Inneren von handelsüblichen Vakuumröhren zu untersuchen und die Wirkungsweise des Kontaktsystems unter realistischen Bedingungen zu beobachten und zu analysieren.

11. Ausblick

Die Messmethode, die in der vorliegenden Arbeit beschrieben wird, sowie die erzielten Messergebnisse weisen ein großes Potential für eine mögliche Weiterarbeit auf. So ist es möglich, mit der vorhandenen Messtechnik mit geringfügigen Modifikationen weitere Messreihen an unterschiedlichen Prüflingen durchzuführen, um mit der hier vorgestellten Vorgehensweise weitere Daten über die Lichtbogenbewegung an diversen Kontaktsystemen und Röhrenmodellen zu sammeln. Andererseits weist das Messsystem noch großes Potential für eine mögliche Weiterentwicklung im Bezug auf die Korrektur der Fehlereinflüsse sowie die genauere Bestimmung der Lichtbogenposition auf.

Aus diesen beiden Aspekten lassen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt folgende Punkte für eine mögliche Weiterarbeit ableiten.

- **Weiterentwicklung der Positionsbestimmung des Lichtbogens:** Die in Kapitel 7 beschriebene Dämpfung des magnetischen Außenfeldes durch Wirbelströme wurde bei der Auswertung der Hall-Sensor-Signale bisher noch nicht berücksichtigt. Aufgrund des hohen Rechenaufwands und der damit verbundenen langen Simulationszeiten von mehreren Tagen pro Einzelsimulation wurden bisher ausschließlich Simulationen bei einem Kontaktabstand von 6 mm durchgeführt. Um ein vollständiges Bild zu erhalten, müsste die Datenbasis um mindestens 7 weitere Simulationsreihen ergänzt werden, um Dämpfungskennlinien für Kontakthübe von 1 mm bis 8 mm zu erhalten. Diese Kennlinien können, ähnlich der Methode der Look-Up-Tabellen, in einer Datenbasis zusammengefasst werden. In einem weiteren Schritt müsste eine zukünftige Auswertung über einen „aktiven Hochpassfilter“ verfügen, der gemäß der auftretenden Rotationsfrequenz und dem zu diesen Zeitpunkt vorherrschenden Kontakthub aus der Datenbasis den entsprechenden Dämpfungswert ausliest und das Hall-Sensor-Signal mit dem Kehrwert diesen Dämpfungswertes mul-

tipliziert. Das Resultat wäre eine weitgehende Kompensation der durch induzierte Wirbelströme verursachte Dämpfung und somit eine erhebliche Verbesserung der Positionsbestimmung. Der Aufwand für diese Maßnahme ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt als hoch einzustufen, da eine Vielzahl von Simulationsreihen notwendig wären. Da jedoch die Wirbelstromdämpfung den größten identifizierten Fehlerfaktor darstellt, ist eine Kompensation ratsam und lohnend.

- **Einbau des Hall-Sensor-Messsystems in eine Einblickröhre:** Der gleichzeitige Einsatz des Hall-Sensor-Messsystems und einer Hochgeschwindigkeitskamera an einer Einblickröhre würde es ermöglichen, die bereits in den Hall-Signalen erkannten Bewegungsformen der langsamen und schnellen Lichtbogenbewegungen mit etablierten und bereits bekannten Lichtbogenmodi in Verbindung zu bringen. Zusätzlich bestünde die Möglichkeit, noch nicht identifizierte Merkmale in den Hall-Sensor-Signalen Lichtbogenerscheinungsformen zuzuordnen, die durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bereits untersucht wurden. Auf diese Weise ließen sich die Resultate der Messdatenauswertung der Hall-Signale überprüfen und erweitern. Somit könnte man den Nutzen des Messsystems weiter vergrößern.
- **Untersuchungen an Topfkontaktsystemen:** Topfkontaktsysteme sind eine Variante der RMF-Kontakte, bei denen der Lichtbogen sich auf einer ringförmigen Kontaktfläche bewegt. Aus diesem Grund ist der Laufbahnradius des Lichtbogens auf die Breite des Kontaktrings beschränkt. Dieser ist in der Regel ähnlich groß wie der zu erwartende Lichtbogendurchmesser. Daher eignen sich Topfkontakte im besonderen Maße, um das Verfahren der Positionsbestimmung durch Hall-Sensoren weiter zu entwickeln.
- **Einsatz einer Transient-Recovery-Voltage (TRV) zusammen mit dem Hall-Sensor-Messsystem:** Diese Untersuchungen könnten eine ähnliche Struktur wie die in Kapitel 8 beschriebenen Messreihen haben, welche mit dem Spulen-basierten-Messsystem durchgeführt wurden. Der höhere Informationsgehalt der Hall-Sensor-Signale verspricht die Möglichkeit einer umfangreicheren Charakterisierung des Zusammenhangs zwischen Lichtbogenbewegungscharakteristik und Ausfallverhalten der Vakuumröhre.

-
- **Adaption des Hall-Sensor-Messsystems auf Axial-Magnetfeld-Kontakte (AMF-Kontakte):** AMF-Kontaktsysteme eignen sich im besonderen Maße für Röhrenmodelle, die größere Kurzschlussströme unterbrechen müssen, als jene Modelle, die mit RMF-Kontaktsystemen ausgestattet sind. Die Weiterentwicklung der Vakuumschalttechnik hin zu höheren Spannungsebenen führt ebenfalls zu der Herausforderung, die dort auftretenden höheren Kurzschlussströme zu unterbrechen. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass für höhere Spannungsebenen vermehrt AMF-Kontaktsysteme zum Einsatz kommen werden. Ein Versagen des AMF-Prinzips führt zu einem Zusammenziehen des diffusen Schaltlichtbogens auf der Kontaktoberfläche, das bis hin zu einer Kontraktion führen kann, wie sie in Kapitel 2.2 beschrieben ist. Dieser Vorgang ist gleichbedeutend mit einer Bewegung der Stromdichteverteilung im Kontaktspalt, die eine Veränderung der Verteilung des magnetischen Außenfeldes der Vakuumröhre hervorruft. An dieser Stelle bietet sich der Einsatz des Hall-Sensor-Messsystems an, um die Wirkungsweise des AMF-Kontaktsystems zu untersuchen und somit die Weiterentwicklung der Vakuumschalttechnik zu unterstützen.

A. Anhang

Messprinzip-bedingte Fehlereinflüsse

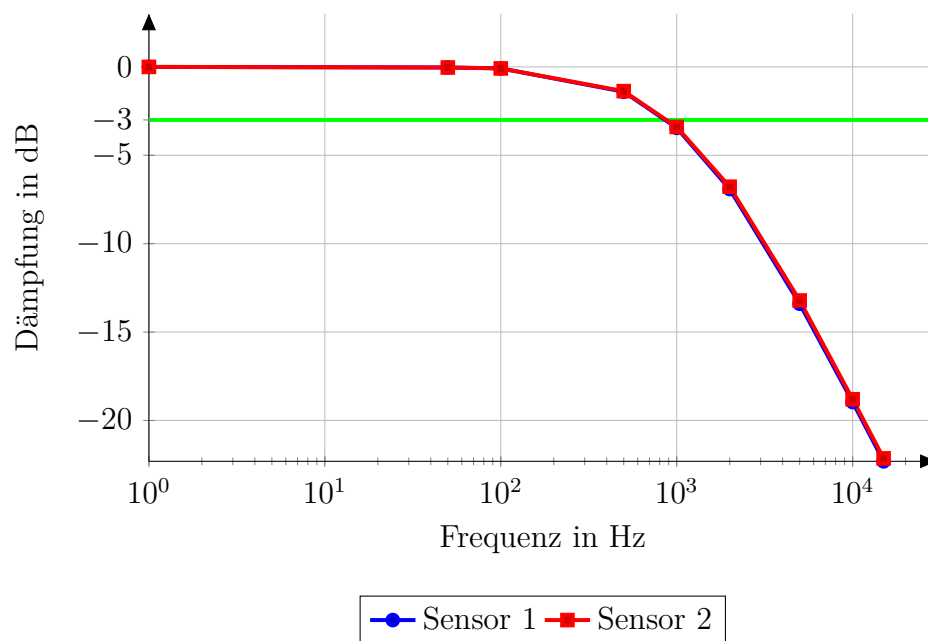


Abbildung A.1.: 32-mm-Plattenkontakt ohne Dampfschirm bei 6 mm Kontaktabstand

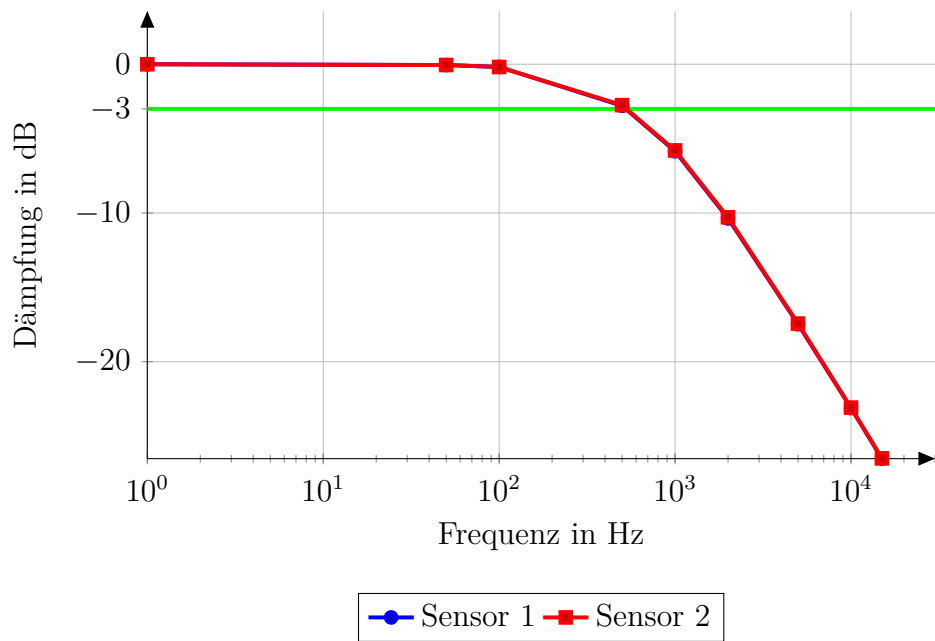


Abbildung A.2.: 45-mm-Plattenkontakt ohne Dampfschirm bei 6 mm Kontaktabstand

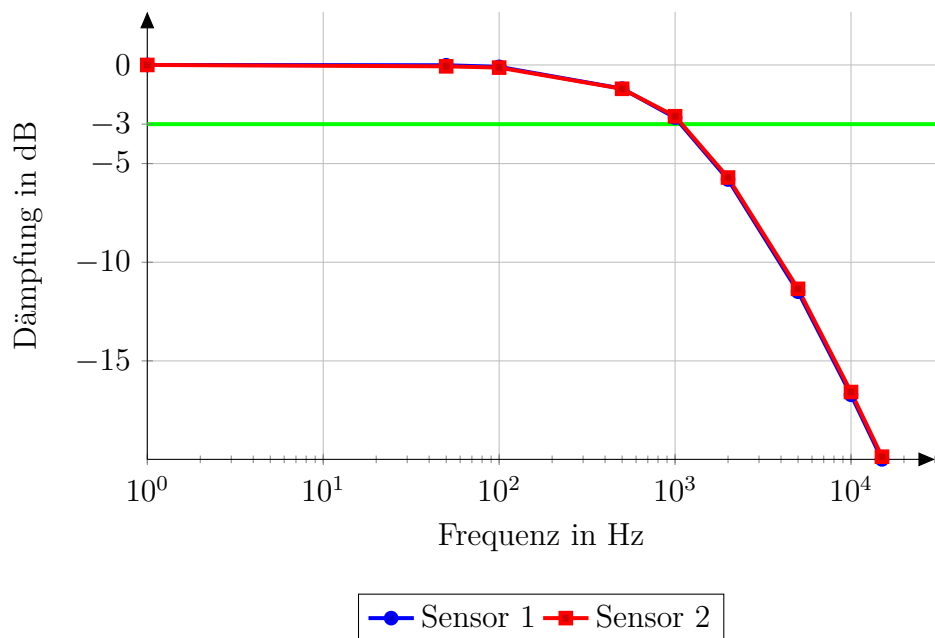


Abbildung A.3.: 32-mm-Spiralkontakt ohne Dampfschirm bei 6 mm Kontaktabstand

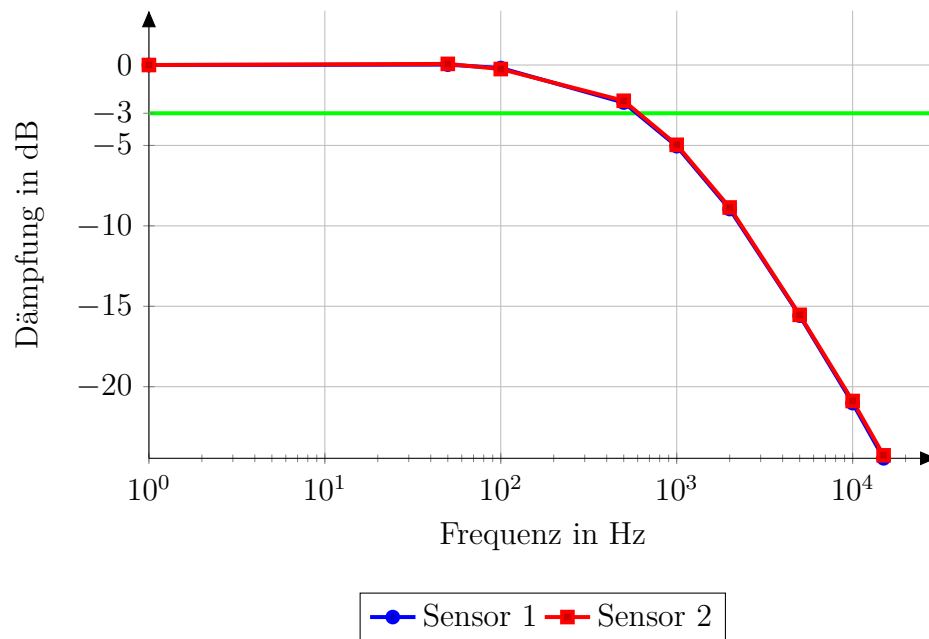


Abbildung A.4.: 45-mm-Spiralkontakt ohne Dampfschirm bei 6 mm Kontaktabstand

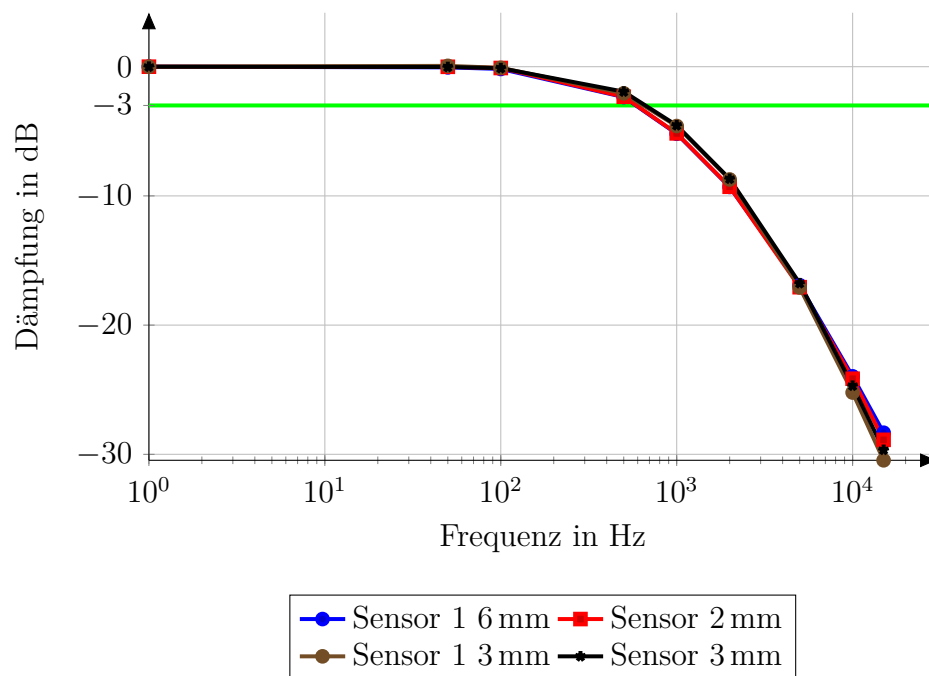


Abbildung A.5.: 45-mm-Spiralkontakt mit Edelstahldampfschirm bei 3 mm und 6 mm Kontaktabstand

Untersuchungen unter Verwendung des Hall-Sensor-basierten Messsystems

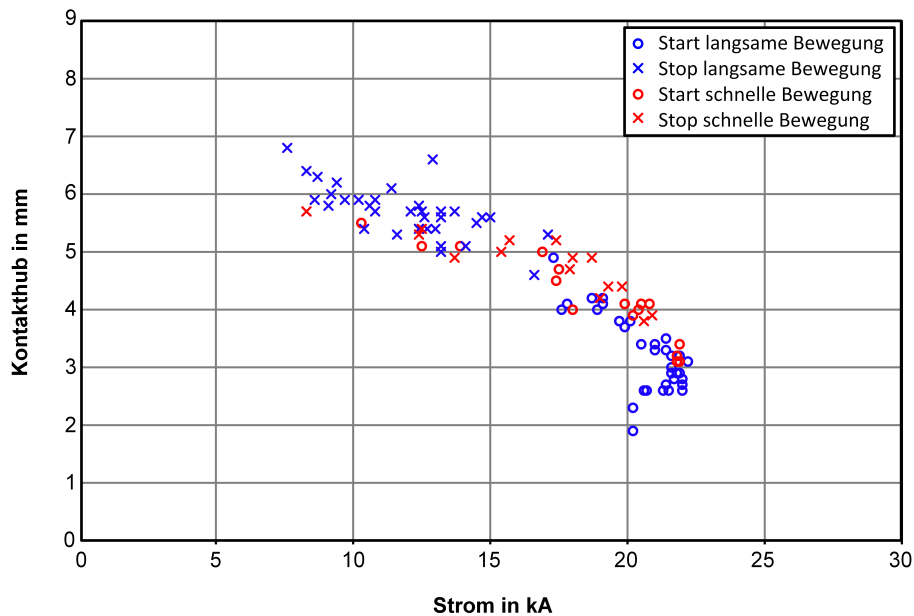


Abbildung A.6.: Lichtbogenzustandsdiagramm der 32-mm-Kontaktgeometrie, positive Dampfschirmpolarität, 0,8 m/s mittlerer Kontaktgeschwindigkeit bei Strömen von 16 kA Effektivwert. Eingetragen sind die Start- und Endpunkte von langsamer und schneller Lichtbogenbewegung.

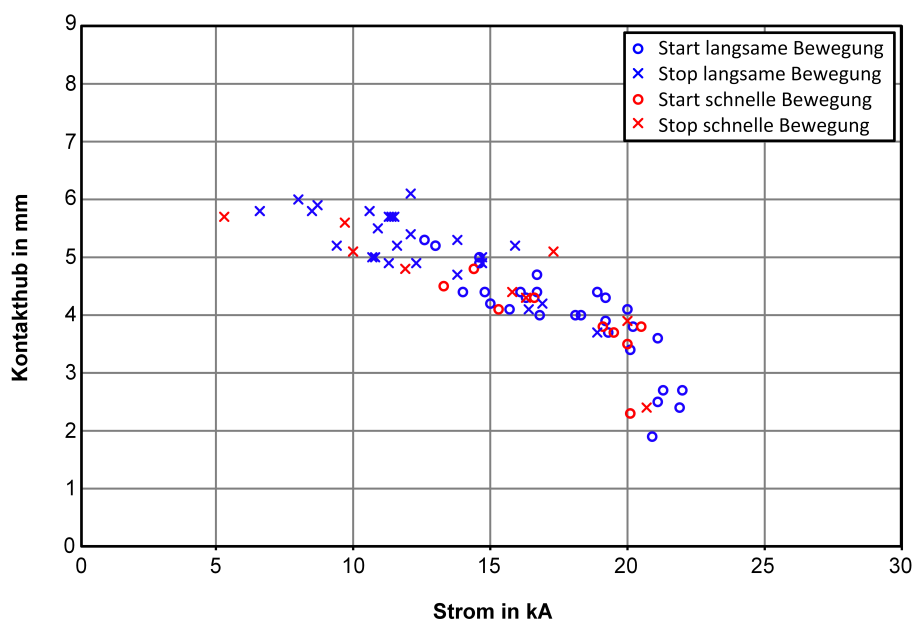


Abbildung A.7.: Lichtbogenzustandsdiagramm der 32-mm-Kontaktgeometrie, negative Dampfschirmpolarität, 0,8 m/s mittlerer Kontaktgeschwindigkeit bei Strömen von 16 kA Effektivwert. Eingezeichnet sind die Start- und Endpunkte von langsamer und schneller Lichtbogenbewegung.

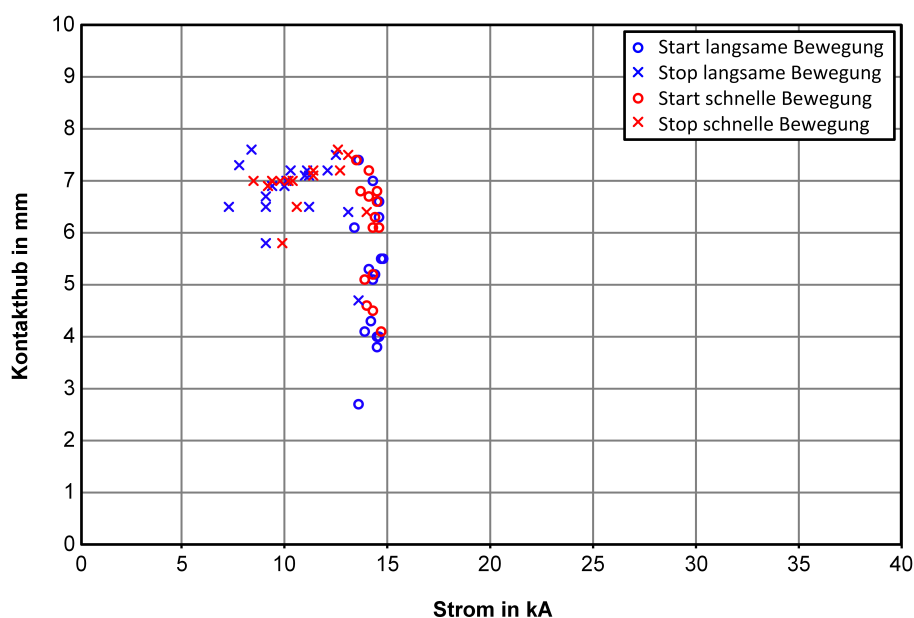


Abbildung A.8.: Lichtbogenzustandsdiagramm der 45-mm-Kontaktgeometrie bei Strömen von 10 kA Effektivwert, und einer mittleren Kontaktgeschwindigkeit von 1,0 m/s. Eingezeichnet sind die Start- und Endpunkte von langsamer und schneller Lichtbogenbewegung.

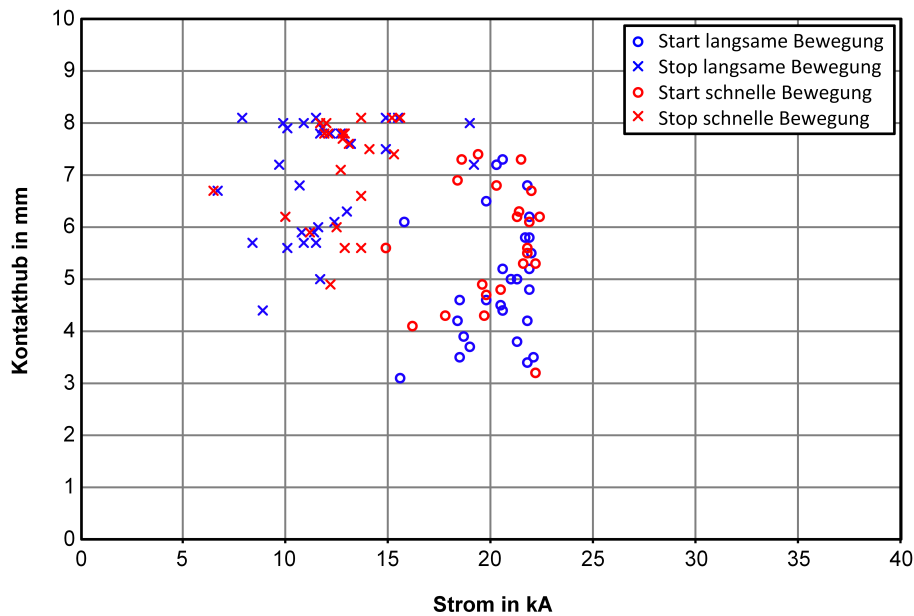


Abbildung A.9.: Lichtbogenzustandsdiagramm der 45-mm-Kontaktgeometrie bei Strömen von 16 kA Effektivwert, und einer mittleren Kontaktgeschwindigkeit von 1,0 m/s. Eingetragen sind die Start- und Endpunkte von langsamer und schneller Lichtbogenbewegung.

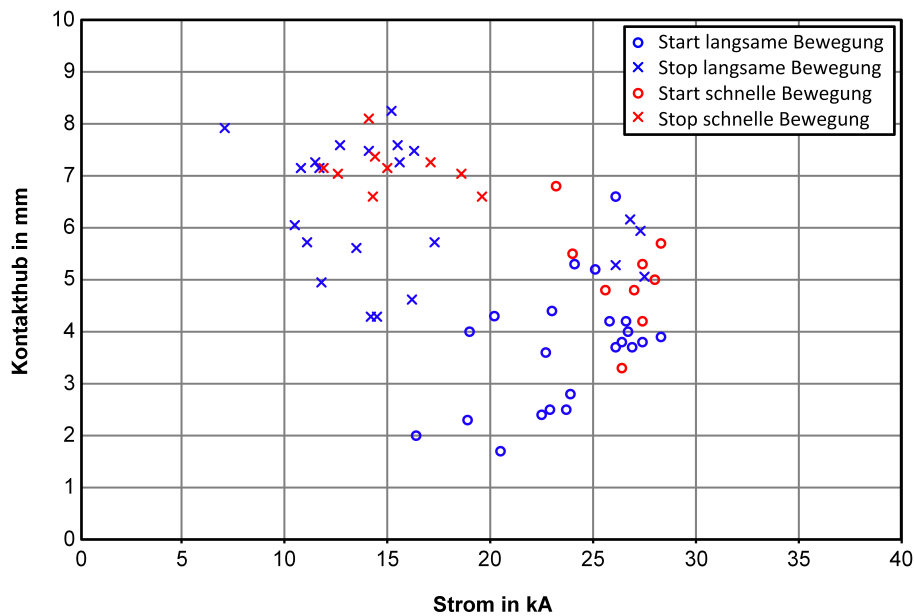


Abbildung A.10.: Lichtbogenzustandsdiagramm der 45-mm-Kontaktgeometrie bei Strömen von 20 kA Effektivwert, und einer mittleren Kontaktgeschwindigkeit von 1,0 m/s. Eingetragen sind die Start- und Endpunkte von langsamer und schneller Lichtbogenbewegung.

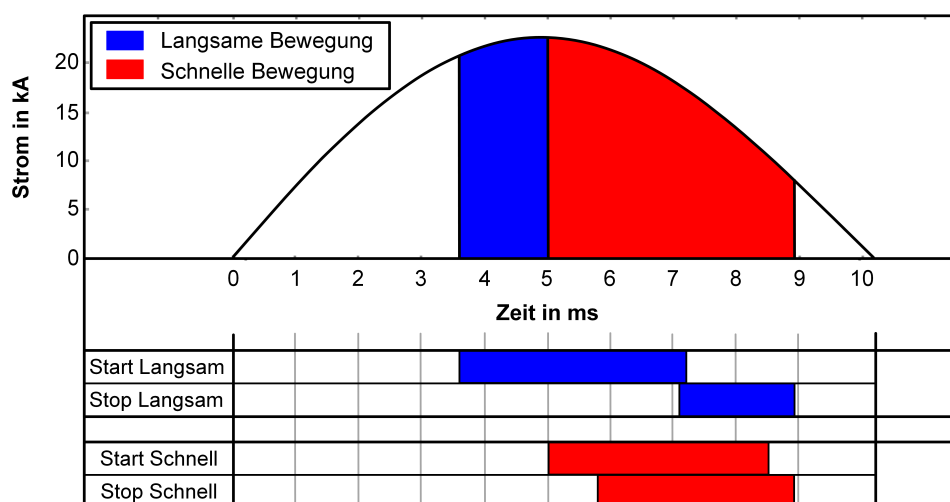


Abbildung A.11.: Ergebnisse der 32-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 16 kA Effektivwert mit positiver Dampfschirmpolarität. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf die Stromhalbschwingung bezogen sind.

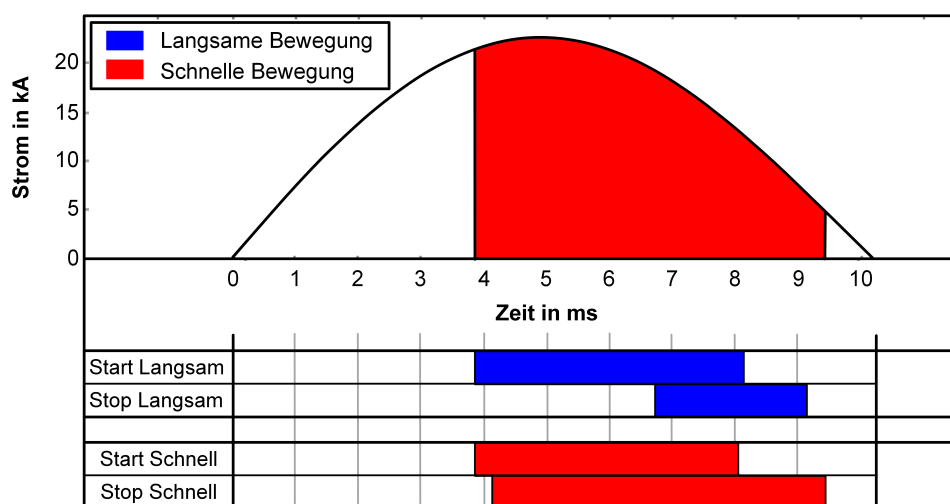


Abbildung A.12.: Ergebnisse der 32-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 16 kA Effektivwert mit negativer Dampfschirmpolarität. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf die Stromhalbschwingung bezogen sind.

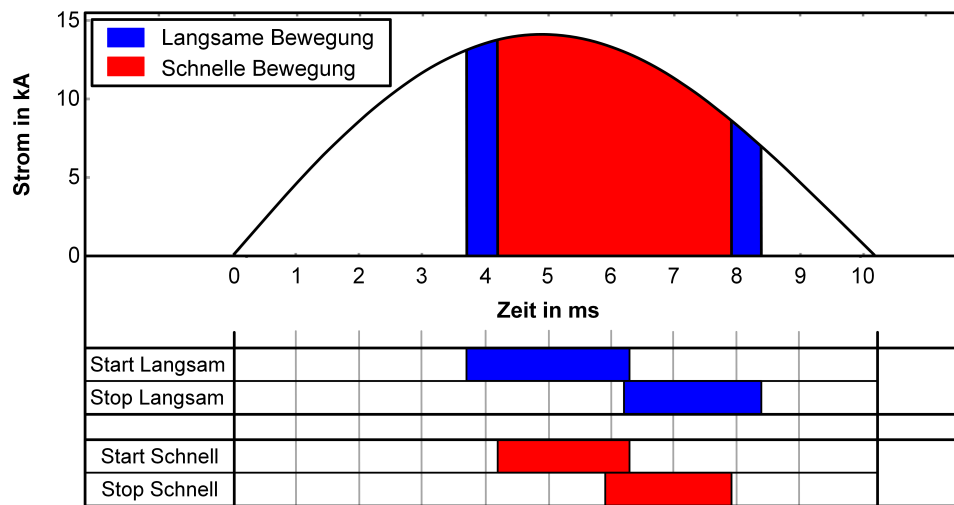


Abbildung A.13.: Ergebnisse der 45-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 10 kA Effektivwert. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf die Stromhalbschwingung bezogen sind.

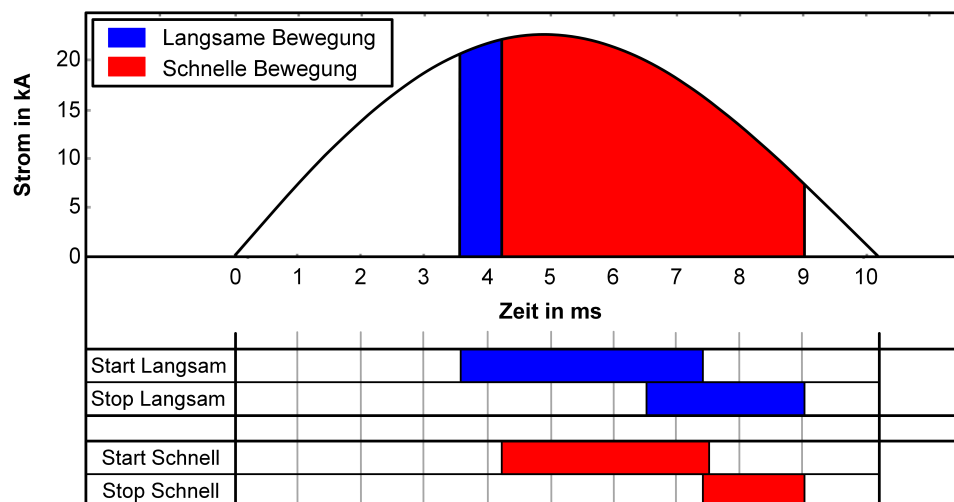


Abbildung A.14.: Ergebnisse der 45-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 16 kA Effektivwert. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf die Stromhalbschwingung bezogen sind.

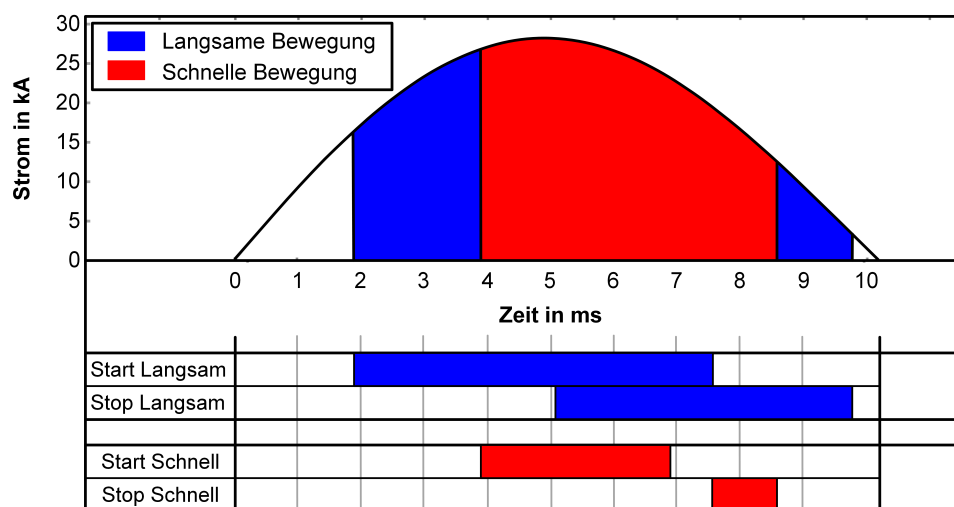


Abbildung A.15.: Ergebnisse der 45-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 20 kA Effektivwert. Dargestellt sind die Start- und Stopppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf die Stromhalbschwingung bezogen sind.

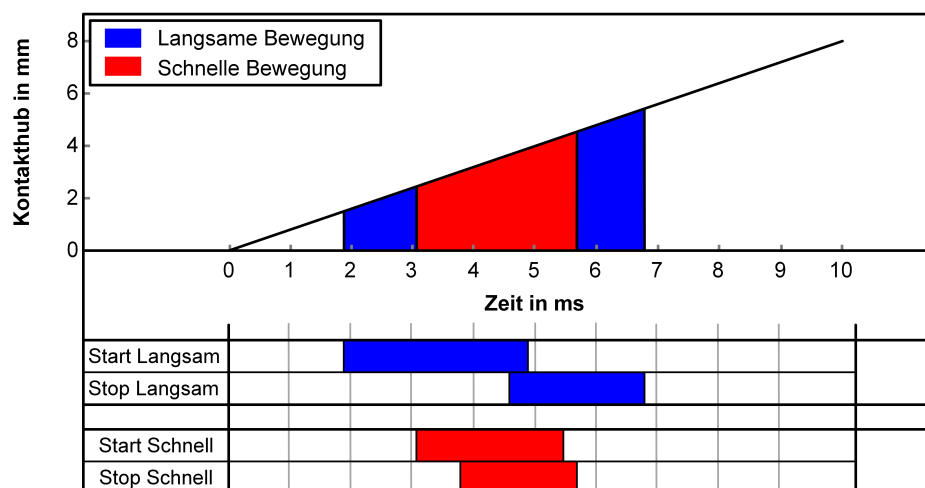


Abbildung A.16.: Ergebnisse der 32-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 16 kA Effektivwert mit positiver Dampfschirmpolarität. Dargestellt sind die Start- und Stopppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf den Verlauf des Kontakthubes bezogen sind. Die Öffnungsgeschwindigkeit beträgt 0,8 m/s.

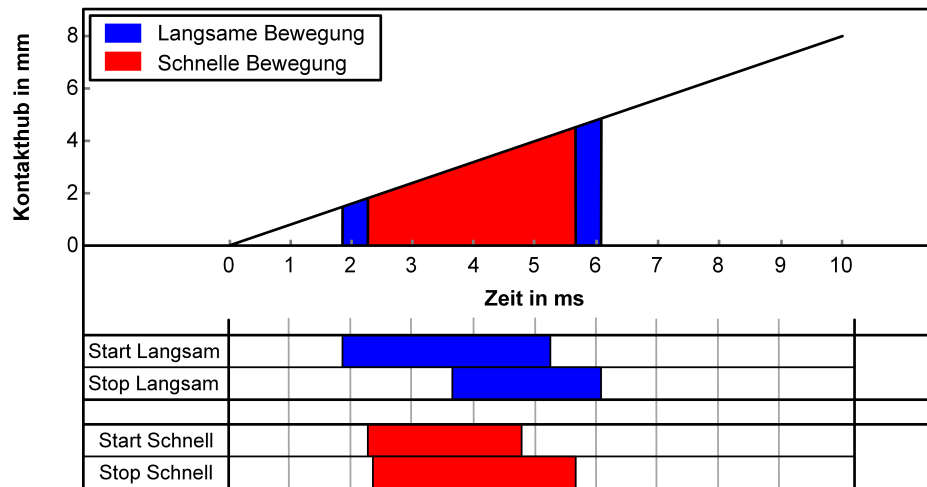


Abbildung A.17.: Ergebnisse der 32-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 16 kA Effektivwert mit negativer Dampfschirmpolarität. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf den Verlauf des Kontakthubes bezogen sind. Die Öffnungsgeschwindigkeit beträgt 0,8 m/s.

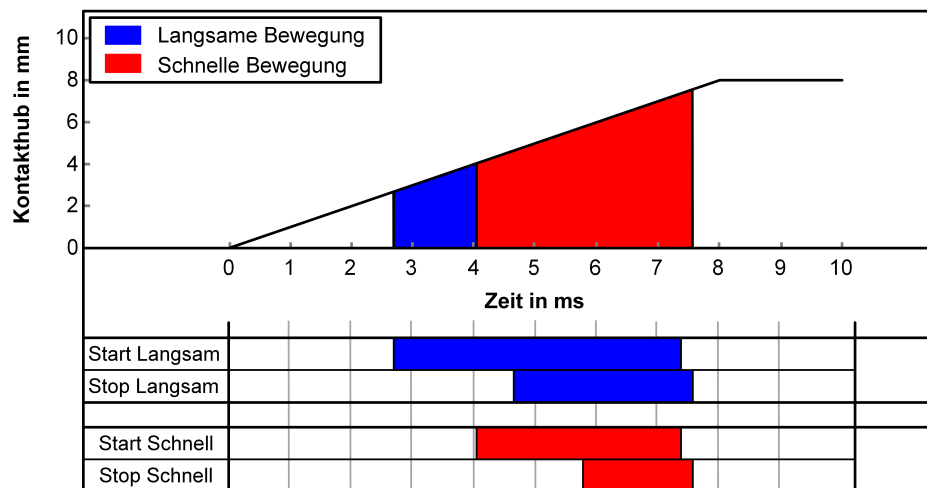


Abbildung A.18.: Ergebnisse der 45-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 10 kA Effektivwert. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf den Verlauf des Kontakthubes bezogen sind. Die Öffnungsgeschwindigkeit beträgt 1,0 m/s.

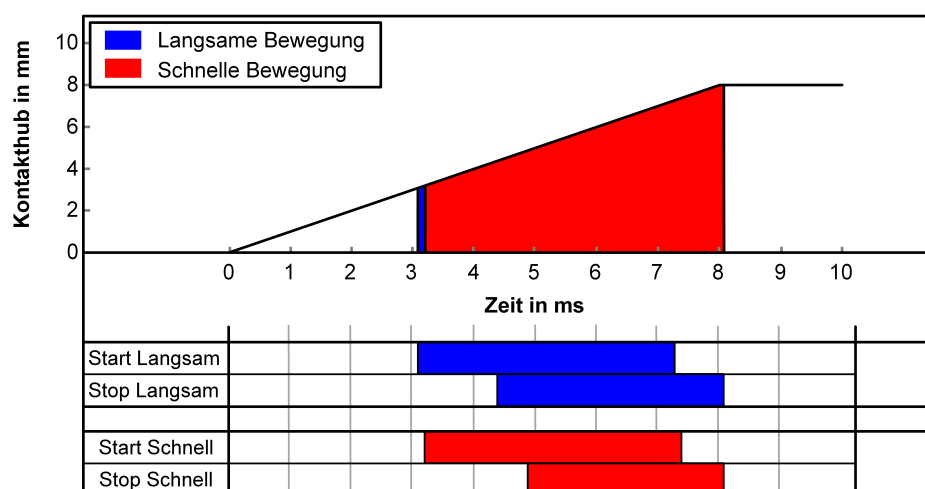


Abbildung A.19.: Ergebnisse der 45-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 16 kA Effektivwert. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf den Verlauf des Kontakthubes bezogen sind. Die Öffnungsgeschwindigkeit beträgt 1,0 m/s.

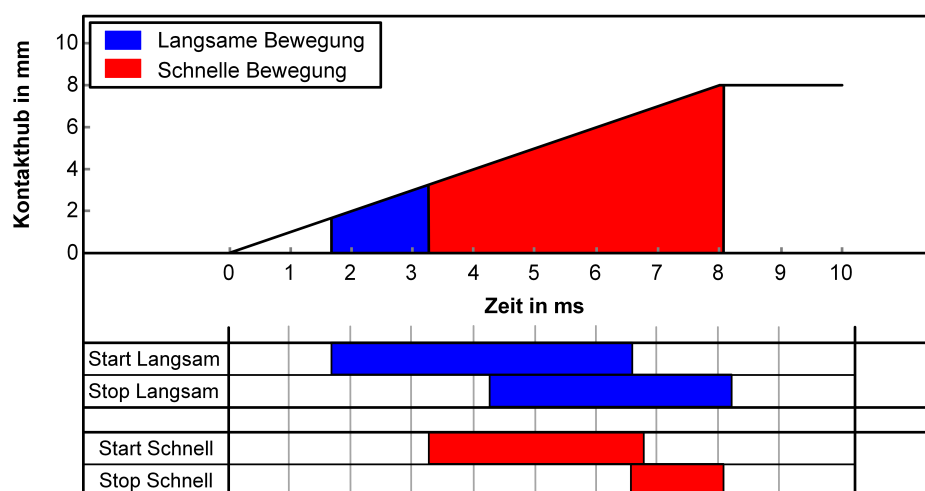


Abbildung A.20.: Ergebnisse der 45-mm-Kontaktgeometrie bei einem Strom von 20 kA Effektivwert. Dargestellt sind die Start- und Stoppbereiche der langsamen- und der schnellen Lichtbogenbewegung, welche auf den Verlauf des Kontakthubes bezogen sind. Die Öffnungsgeschwindigkeit beträgt 1,0 m/s.

Der synthetische Prüfkreis

Die praktischen Untersuchungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, fanden an der synthetischen Schalterprüfanlage des Fachgebietes Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt statt. Hierbei handelt es sich um einen Aufbau, der nach dem Weil-Dobke-Prinzip entworfen ist.

Abbildung A.21 zeigt das prinzipielle Schaltbild. Die genauen Daten der einzelnen Bauteile können der Tabelle A.2 entnommen werden. Das synthetische Prinzip einer Schalterprüfanlage sieht eine Trennung des Aufbaus in einen Hochstrom- und einen Hochspannungskreis vor. Diese Kreise überlagern sich nur am Prüfling. Der Hochstromkreis besteht aus einer Kondensatorbank, die in drei parallel geschaltete Gruppen aufgeteilt ist. Jede Gruppe hat eine Gesamtkapazität von etwa $4 \mu\text{F}$.

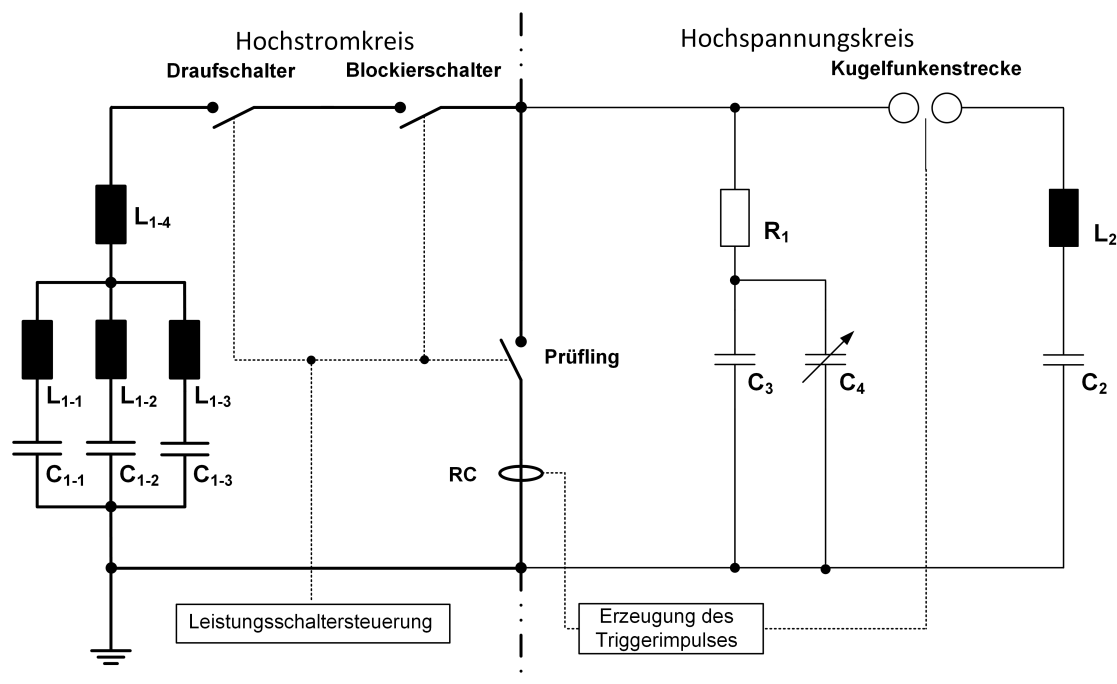


Abbildung A.21.: Schaltbild der synthetischen Schalterprüfanlage des Fachgebietes Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Tabelle A.1.: Technische Daten der Elemente der synthetischen Schalterprüfanlage.

Bauteil	Spezifikation
Kondensatorbank C_1	Hersteller: BICC Kondensatortyp: Stoßkondensator, umpolfest Max. Ladespannung: 15 kV Kapazität: $5,32 \mu\text{F}$ Gesamtanzahl: 2248 Gesamtkapazität: 11,96 mF (berechnet) Energiegehalt: 1,346 MJ Schaltung: Aufteilung in drei Blöcke C_{1-1} : 4,156 mF (gemessen) C_{1-2} : 3,725 mF (gemessen) C_{1-3} : 4,12 mF (gemessen)
Kondensatorbank C_2	Hersteller: BICC Kondensatortyp: Stoßkondensator, umpolfest Gesamtanzahl: 7 Gesamtkapazität: $18,62 \mu\text{F}$
Kondensator C_3	Hersteller: Baukastensystem Gesamtkapazität: 1200 pF
Kondensatorbank C_4	Hersteller: Eigenbau Kondensatortyp: Folienkondensator (Wima) Gesamtkapazität: variabel
Drosselspule L_{1-1}	Hersteller: Eigenbau Spulentyp: Luftspule Induktivität: 9,74 mH
Drosselspule L_{1-2}	Hersteller: Eigenbau Spulentyp: Luftspule Induktivität: 10,96 mH
Drosselspule L_{1-3}	Hersteller: Eigenbau Spulentyp: Luftspule Induktivität: 9,87 mH
Drosselspule L_{1-4}	Hersteller: BBC Spulentyp: Netzdrossel Induktivität: 0,55 mH
Drosselspule L_2	Hersteller: BBC Spulentyp: Luftspule Induktivität: 6,5 mH
Widerstand R_1	Hersteller: Eigenbau Widerstandstyp: Drahtwiderstand Widerstandswert: 68Ω

Zu Beginn des Prüfablaufes werden der Blockierschalter und der Prüfling geschlossen. Der Draufschalter wird geöffnet. Somit ist der Hochstromkreis geöffnet. Der Ladeprozess der Hauptkapazität C_1 kann beginnen. Er endet mit der Ladespannung der Kondensatoren, die zur gewünschten Stromamplitude führt. Zeitgleich wird die Hochspannungskapazität C_2 auf einen der gewünschten Einschwingspannung entsprechenden Wert geladen. Der weitere Prüfablauf wird durch eine Mikrocontrollersteuerung kontrolliert. Sie berücksichtigt die individuellen Verzugszeiten der einzelnen Schaltgeräte und steuert den zeitlich korrekten Ablauf der einzelnen Schalthandlungen. Als erstes schließt der Draufschalter und schließt damit den Hochstromkreis. Der sich aus der Resonanzfrequenz des Hochstromkreises einstellende sinusförmige Hochstrom fließt durch den Prüfling. Vier Millisekunden nach Schließen des Draufschalters öffnet der Blockierschalter, um zu gewährleisten, dass der Hochstrom nach der ersten Halbwelle sicher unterbrochen wird, auch wenn der Prüfling versagen sollte und den Strom nicht unterbrechen sollte. Der Strom fließt über den im Blockierschalter sich ausbreitenden Lichtbogen weiter. Der Prüfling öffnet entsprechend der gewünschten Lichtbogenzeit nach Schließen des Draufschalters. Die positive Stromflanke des Hochstroms wird mit einer Rogowskispule detektiert. Ein Triggergerät generiert einen Impuls zur Zündung der Kugelfunkenstrecke des Hochspannungskreises. Der Zeitversatz zwischen Einsatz des Hochstromes und Ausgabe des Triggerimpulses für die Kugelfunkenstrecke lässt sich variabel einstellen. Üblicherweise findet dies etwa 1 ms vor dem Stromnulldurchgang statt. Mit dem Zünden der Kugelfunkenstrecke schließt sich der Hochspannungskreis über den Lichtbogen im Prüfling. Ein Schwingkreis entsteht. Im Falle der erfolgreichen Ausschaltung des Prüflings schwingt der Hochspannungskreis über den parallelen Zweig R_1 und C_3 , der bis dahin vom Schaltlichtbogen überbrückt war, aus. Die am Prüfling abfallende Spannung stellt dabei die wiederkehrende Spannung, auch **Transient Recovery Voltage (TRV)** genannt, dar. Sie dient zur Prüfung der Wiederverfestigung der Schaltstrecke. Die Steilheit der TRV lässt sich mit der variablen Kapazität C_3 einstellen. Abbildung A.22 zeigt den Verlauf des Hochstromes, des Stromes des Hochspannungskreises sowie der wiederkehrenden Spannung einer erfolgreichen Stromunterbrechung.

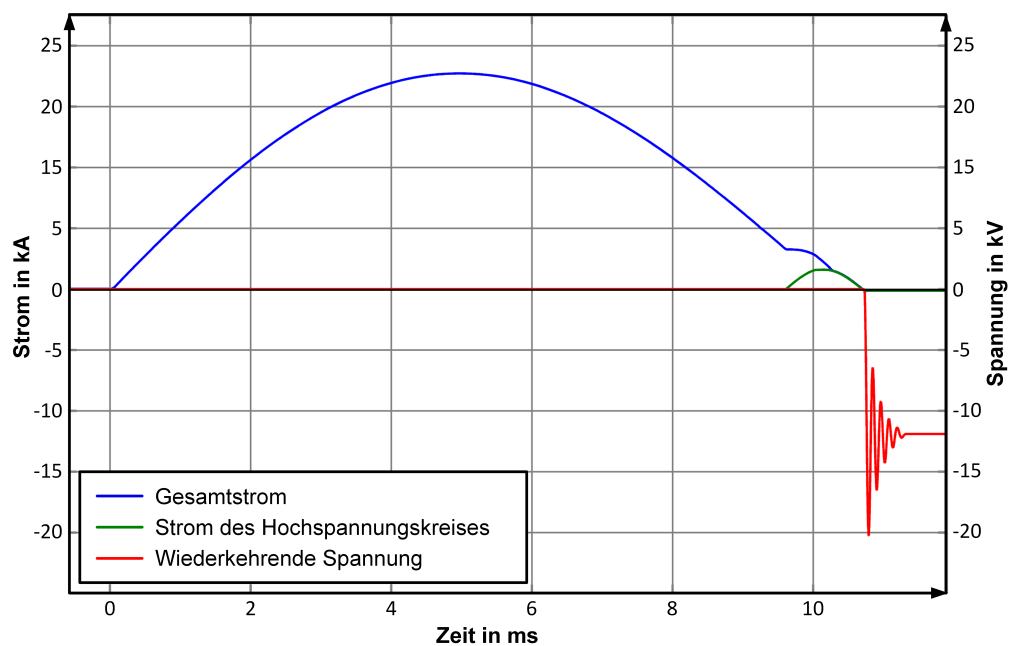


Abbildung A.22.: Verlauf des Hochstromes, des Stromes des Hochspannungskreises sowie der wiederkehrenden Spannung, einer erfolgreichen Stromunterbrechung.

Der Vorteil der synthetischen Prüfung liegt in der Flexibilität in Bezug auf die Form des Hochstromes sowie der wiederkehrenden Spannung. Ein weiterer Vorteil ergibt sich für die Belastung des Prüflings. So wird der resultierende Strom eines Schaltversagers nur durch den Hochspannungskreis getrieben, da der Blockierschalter zu diesem Zeitpunkt den Hochstromkreis bereits abgetrennt hat. Der Energieinhalt des Hochspannungskreises beträgt in jedem Fall nur einen Bruchteil von dem des Hochstromkreises. Daher ist der Verschleiß bei einem Schaltversager nahezu identisch mit dem eines erfolgreichen Ausschaltvorgangs.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten wiederkehrenden Spannungen wurden entsprechend der Norm [IEC 2003] gewählt. Dort sind ebenfalls die Prüfbedingungen sowie die Normwerte der wiederkehrenden Spannung für Leistungsschalterprüfungen definiert. Eine ausführliche Beschreibung von synthetischen Prüfungen sowie der Funktionsweise der synthetischen Schalterprüfanlage des Fachgebietes Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt ist in den Arbeiten [Fug 2003; Bet 1999] zu finden.

Tabelle A.2.: Auflistung der verwendeten Messtechnik

Gemessener Wert	Verwendete Messtechnik
Hochstrom I_1	Rogowskispule Hersteller: PEM Messbereich: bis 60 kA -3 dB-Grenzfrequenz: 16 MHz
Hochspannungsstrom I_2	Rogowskispule Hersteller: PEM Messbereich: bis 400 kA -3 dB-Grenzfrequenz: 16 MHz
Lichtbogenspannung U_{Libo}	Gedämpft-kapazitiver-Spannungsteiler Hersteller: Eigenbau Übersetzungsverhältnis 271 : 1 Grenzfrequenz: >10 MHz
Wiederkehrende Spannung U_{trv}	Kapazitiver Spannungsteiler Hersteller: Eigenbau Übersetzungsverhältnis 1033 : 1
Kontakthub h	Resistiver Linearwegsensor Hersteller: Penny and Giles Modell: SLS190

Literaturverzeichnis

Literatur

- [And 1990] Andre Anders. *The Physics of Cathode Processes*. 1. Auflage. Band 50. Springer-Verlag Berlin Heidelberg NewYork, 1990. isbn: 978-0-387-79108-1.
- [And 1992] Andre Anders, S. Anders, B. Juttner, H. Pursch, W. Botticher und H. Luck. „Vacuum arc cathode spot parameters from high-resolution luminosity measurements“. In: *IEEE Journal of Applied Physics* 71 (10 1992), Seiten 4763–4770. issn: 0021-8979.
- [Bal 1993] J. Ballat. „Untersuchungen zum Emissionsstrom-, Konditionierungs- und Schweißverhalten von Vakuum-Schaltstrecken mit CuCr-Kontaktstücken“. Dissertation. TH Darmstadt, 1993.
- [Beh 1984] Friedrich-Wilhelm Behrens. „Über den Einfluß der Elektrodengeometrie auf das Ausschaltverhalten von Vakuumleistungsschaltern“. Dissertation. TU Braunschweig, 1984.
- [Bet 1999] Thomas Betz. „Ausschaltverhalten von in Serie geschalteten Vakuumschaltkammern unter Berücksichtigung der Potentialaufteilung“. Dissertation. TU Darmstadt, 1999.
- [BG 1991] Ian G. Brown und Xavier Godechot. „Vacuum arc ion charge-state distributions“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 19 (5 1991), Seiten 713–717. issn: 0093-3813.
- [Bie 1993] Volker Biewendt. „Einfluß der Schirm- und Kontaktgeometrie auf das Löschverhalten von Vakuumleistungsschaltern“. Dissertation. TU Braunschweig, 1993. isbn: 3-1814-4621-1.

- [BMS 1985] R. L. Boxman, P. J. Martin und D. Sanders. *Handbook Of Vacuum Arc Sciences And Technology: Fundamentals And Applications*. 1. Auflage. Crest Publishing House, 1985. isbn: 9788124205341.
- [Box 1977] R. L. Boxmann. „Magnetic Constriction Effects in High-Current Vacuum Arcs Prior to Release of Anode Vapour“. In: *Journal of Applied Physics* 48 (6 1977), Seiten 2338–2345.
- [Bur 1985] Günter Burkhard. *Schaltgeräte der Elektroenergie-technik. Grundlagen und technische Ausführung*. 1. Auflage. VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, 1985. isbn: 978-3800713936.
- [Cza 1986] L. Czarnecki. „Einfluss des Kontaktwerkstoffes auf Stromabriss und Löschung des Vakuumbogens“. Dissertation. TU Braunschweig, 1986.
- [Daa 1978] Jaap E. Daalder. „Cathode Erosion of Metal Vapour Arcs in Vacuum“. Dissertation. TU Eindhoven, 1978.
- [DM 1969] William D. Davis und H. C. Miller. „Analysis of the Electrode Products Emitted by dc Arcs in a Vacuum Ambient“. In: *Journal of Applied Physics* 40 (5 1969), Seiten 2212–2221. issn: 0021-8979.
- [Don 2010] Huajun Dong, Yanqing Wu, Xiaodong Tan, Xiaojing Tian, Enyuan Dong und Jiyan Zou. „Researches on Vacuum Arc Images Based on Digital Image Processing“. In: *IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI)* 2 (2010), Seiten 247–250.
- [DSS 2003] E. Dullni, E. Schade und W. Shang. „Vacuum arcs driven by cross-magnetic fields (RMF)“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 31 (5 2003), Seiten 902–908. issn: 0093-3813.
- [Eck 1974] Günter Ecker. „Das Chopping-Phänomen“. In: *Beiträge aus der Plasmaphysik* 14 (3 1974), Seiten 67–78.
- [Ele 2011a] Hoeben Electronics. *APPLICATION NOTE HE 144 Hall sensor offset compensation*. 2011.
- [Ele 2011b] Hoeben Electronics. *Datenblatt HE 144 series Analog Hall sensors*. 2011.

- [ET 1990] Joseph A. Eichmeier und Manfred Thumm. *Vacuum Electronics: Components and Devices*. 1. Auflage. Springer-Verlag Berlin, 1990. isbn: 978-3-540-71928-1.
- [Far 1978] G. A. Farrall. „Recovery of Dielectric Strength after Current Interruption in Vacuum“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 6 (4 1978), Seiten 360–369. issn: 0093-3813.
- [Fen 1998] Burkhard Fenski. „Verhalten von Axialmagnetfeldkontakten in Vakuumleistungsschaltern: Experimente und Simulationen“. Dissertation. TU Braunschweig, 1998.
- [FHS 2000] Harald Fink, Markus Heimbach und Wenkai Shang. „Vakuumschaltkammern mit Axialmagnetfeldkontakten für Mittelspannungsschalter“. In: *ABB Technik* 1 (2000), Seiten 59–64.
- [Fin 1994] Harald Fink. „SF₆-isolierte 52 kV-Mittelspannungsschaltanlage mit Vakuumschalter.“ In: *Etz Bd. 115* Heft 11 (1994), Seiten 622–629.
- [Fis 1985] Reinhard Fischer. „Untersuchungen zur Anodenfleckbildung von Schaltlichtbögen im Vakuum“. Dissertation. RWTH Aachen, 1985.
- [Fug 2003] Thorsten Fugel. „Schalt- und Ausgleichvorgänge in einer Rheianordnung von zwei 24-kV-Vakuumschaltkammern“. Dissertation. TU Darmstadt, 2003.
- [Geb 1985] R. Gebel, G. Lins, B. J. Baul und I. Paulus. *Grundlagenarbeiten zur Entwicklung von Vakuumschaltern*. 7. Auflage. Siemens Energie & Automation, 1985. isbn: 0177-6134.
- [Gen 2002] D. Gentsch. „Testverfahren für Kontaktwerkstoffe vor dem Einsatz in Vakuumschaltkammern“. Dissertation. TU Braunschweig, 2002.
- [GS 2005] D. Gentsch und W. Shang. „High-speed observations of arc modes and material erosion on RMF- and AMF-contact electrodes“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 33 (5 2005), Seiten 1605–1610. issn: 0093-3813.

- [Guo 2011] Kong Guowei, Zhiyuan Liu, Wang Dong und Rong Mingzhe. „High-Current Vacuum Arc: The Relationship Between Anode Phenomena and the Average Opening Velocity of Vacuum Interrupters“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 39 (6 2011), Seiten 1370–1378. issn: 0093-3813.
- [Hal 2012] Patrick Halbach. „Einfluss des Prüfkreises auf das Abreißstromverhalten von Vakuumschaltern unter Berücksichtigung spezieller Netzkonfigurationen in der Mittelspannung“. Dissertation. TU Darmstadt, 2012.
- [Hey 1990] Dieter Heyn. „Untersuchung zum Einsatz des Kathodenwerkstoffes auf das Löschverhalten im Vakuum“. Dissertation. TU Braunschweig, 1990.
- [HG 1980] J. V. R. Heberlein und J. G. Gorman. „The High Current Metal Vapor Arc Column between Separating Electrodes“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 8 (4 1980), Seiten 283–288. issn: 0093-3813.
- [Huh 1986] P. Huhse und H. J. Reinhardt. „Arc Motion in Vacuum Circuit Breakers“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 14 (4 1986), Seiten 460–463. issn: 0093-3813/86/0800-0460.
- [IGB 1983] I. Izraeli, S. Goldsmith und R. L. Boxman. „The Influence of the Self-Magnetic Field on the Steady-State Current Distribution in an Axially Flowing Conducting Medium“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 11 (3 1983), Seiten 160–164. issn: 0093-3813.
- [Jüt 1979] B. Jüttner. „Erosion Craters and Arc Cathode Spots in Vacuum“. In: *Beiträge aus der Plasmaphysik* 19 (1 1979), Seiten 25–48.
- [Kau 1997] Johannes Kaumanns. „Untersuchung des Stromnulldurchgangs von Vakuum-Leistungsschaltern“. Dissertation. RWTH Aachen, 1997.
- [Kim 1971] C. W. Kimblin. „Vacuum arc ion currents and electrode phenomena“. In: *Proceedings of the IEEE* 59 (4 1971), Seiten 546–555. issn: 0018-9219.
- [Kim 1973] C. W. Kimblin. „Erosion and ionization in the cathode spot regions of vacuum arcs“. In: *Journal of Applied Physics* 44 (7 1973), Seiten 3074–3081. issn: 0021-8979.

- [KK 2011] Byoung-Chul Kim und Sung-Tae Kim. „The Influence of Bridged Slots on Arc Behavior in Spiral Type Vacuum Interrupter“. In: *International Conference on Electric Power Equipment* (2011), Seiten 98–101. issn: 978-1-4577-1272-2.
- [Kur 1980] Y. Kurosawa. „Vacuum Circuit Breaker Electrode Generating Multi-Pole Axial Magnetic Field and its Interruption Ability“. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 99 (6 1980), Seiten 2079–2085. issn: 0018-9510.
- [Laf 1980] James M. Lafferty. *Vacuum Arcs - Theorie and Application*. 1. Auflage. John Wiley und Sons, 1980. isbn: 978-0471065067.
- [Lat 1981] Rod V. Latham. *High Voltage Vacuum Insulation: Basis Concepts and Technological Concepts*. 1. Auflage. Academic Press, 1981. isbn: 978-0123994943.
- [Lin 1987] Manfred Lindmayer. *Schaltgeräte Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise*. 1. Auflage. Springer-Verlag Berlin, 1987. isbn: 978-3642522680.
- [Lin 2001] Manfred Lindmayer. *Vakuum-Plasmadichte im Stromnullbereich und ihr Abklingen*. DFG Abschlussbericht, TU Braunschweig, 2001.
- [Lip 2003] Hans Joachim Lippmann. *Schalten im Vakuum*. 1. Auflage. VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, 2003. isbn: 3-8007-2317-4.
- [Lit 1988] E. A. Litvinov. „An Explosive Emission Modell of The Vacuum Arc Cathod Spot“. In: *XIII International Symposia on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum* 1 (1 1988), Seite 158.
- [Mit 1970a] G. R. Mitchell. „High-current vacuum arcs. Part 1: An experimental study“. In: *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 117 (12 1970), Seiten 2315–2326.
- [Mit 1970b] G. R. Mitchell. „High-current vacuum arcs. Part 2: Theoretical outline“. In: *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 117 (12 1970), Seiten 2327–2332.
- [Pav 2005] D. Pavelescu, G. Pavelescu, F. Gherendi, C. Nitu, G. Dumitrescu, S. Nitu und P. Anghelita. „Investigation of the rotating arc plasma generated in a vacuum circuit breaker“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 33 (5 2005), Seiten 1504–1510.

- [Pav 2007] D. Pavelescu, G. Dumitrescu, G. Pavelescu, F. Gherendi, S. A. Nitu, V. Braic und P. Anghelita. „Moving Arc Study and Plasma Diagnosis in Vacuum Interrupters With TMF Contacts“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 35 (4 2007), Seiten 866–872.
- [Pla 2008] Plansee GmbH. *Copper Chromium (CuCr) Contact Materials for Vacuum Interrupters*. Informationsbroschüre, 2008.
- [Pro 1986] Johannes Prock. „Zur Theorie der Kraterbildung auf Metallkathoden in Vakuumlichtbögen“. Dissertation. TU München, 1986.
- [Ree 1963] M. P. Reece. „The Vacuum Switch. Part 1: Properties of the vacuum arc“. In: *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 110 (4 1963), Seiten 793–802. issn: 0020-3270.
- [Rei 1983] U. Reininghaus. „Schaltverhalten unterschiedlicher Kontaktwerkstoffe im Vakuum“. Dissertation. TU Braunschweig, 1983.
- [Ren 2000] Roman Renz. „On Criteria of Optimized Application on AMF- and RMF-Contact Systems in Vacuum Interruptors“. In: *19th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China* 1 (2000), Seiten 176–179. issn: 0-7803-5791-4.
- [Ret 2012] Thomas Rettenmaier, V. Hinrichsen, A. Lawall, E. D. Taylor und J. Teichmann. „Detektion von Verschleißerscheinungen an Mittelspannungsvakuumschaltröhren durch die Messung der Lichtbogenbeweglichkeit mittels externer Magnetfeldsensoren“. In: *ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel* (2012). issn: 978-3-8007-3465-8.
- [Rus 1994] C. Rusteberg. „Bestimmung von Plasmaparametern in Vakuum- Hochstrombögen“. Dissertation. TU Braunschweig, 1994.
- [Sch 1993] M. B. Schulman. „Separation of spiral contacts and the motion of vacuum arcs at high AC currents“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 21 (5 1993), Seiten 484–488. issn: 0093-3813.
- [Sch 2009] Stefan Schäfer, V. Hinrichsen, U. Schümann, J. Teichmann und N. Wenzel. „Erfassung der Rotation eines kontrahierten Lichtbogens in industriell gefertigten RMF-Vakuumschaltkammern ohne Entfernung des Metaldampfschirms“. In: *Internationaler ETG-Kongress Düsseldorf* (2009).

-
- [Sen 1997] Peter Sentker. „Die elektrische Festigkeit von Mehrfachunterbrechungen im Hochvakuum“. Dissertation. TU Braunschweig, 1997. isbn: 084-12013111464.
- [SGR 1986] E. Schade, B. Gellert und U. Reininghaus. „Forschung für Vakuum-schaltkammern“. In: *Carlors Emag Mitteilungen* (1986), Seiten 4–8.
- [Sie 2008] Siemens AG. *Vakuum-Schalttechnik und Komponenten für die Mittelspannung*. Informationsbroschüre, 2008.
- [SL 2003] Kathrin Steinke und Manfred Lindmayer. „Current zero behavior of vacuum interrupters with bipolar and quadrupolar AMF contacts“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 31 (5 2003), Seiten 934–938. issn: 0093-3813.
- [Sla 1984] Paul G. Slade. „The Vacuum Interrupter Contact“. In: *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology* 7 (1 1984), Seiten 25–32. issn: 0148-6411.
- [Sla 1994] Paul G. Slade. „Advances in material development for high power, vacuum interrupter contacts“. In: *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology* 17 (1 1994), Seiten 96–106. issn: 1070-9886.
- [Sla 2008] Paul G. Slade. *The Vacuum Interrupter - Theory, Design and Application*. 1. Auflage. CRS Press, 2008. isbn: 0-8493-9091-5.
- [SR 1979] D. Schuöcker und W. Reif. „Anodische Kontraktion des Vakuumbo-gens bei hohen Strömen“. In: *Siemens Forschungs- und Entwicklungs-berichte* 8 (3 1979), Seiten 162–167.
- [SS 1984] Hans Schellekens und D. C. Schramm. „Current and Voltage Distri-bution in the Diffuse Vacuum Arc“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 13 (5 1984), Seiten 261–264. issn: 0093-3813.
- [Tei 1999] Jörg Teichmann. „Kaltkathoden-Thyratrons mit schalterintern erzeugten Magnetfeldern“. Dissertation. Universität Bochum, 1999. isbn: 3-18-326421-8.
- [Tem 2003] S. Temborius. „Schalteigenschaften von Kontaktmaterialien für Va-kuumschütze“. Dissertation. TU Braunschweig, 2003.
- [Thy 2014] ThyssenKrupp Nirosta GmbH. *Datenblatt Nirosta 4432*. 2014.

- [TK 1992] K. Tsuruta und K. Suzuki und K. Kunitsu. „Vacuum arc ion charge-state distributions“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 20 (2 1992), Seiten 99–103. issn: 0093-3813.
- [Uph 1988] Peter Uphoff. „Untersuchungen über Erscheinungsformen von Vakuumbögen unter Magnetfeldeinfluss“. Dissertation. TU Braunschweig, 1988. isbn: 722129376.
- [Vin 2002] E. Vinaricky. *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin, 2002. isbn: 978-3642522680.
- [WAW 2000] Max Wutz, Hermann Adam und Wilhelm Walcher. *Handbuch Vakuumtechnik: Theorie und Praxis*. 7. Auflage. Vierweg Verlagsgesellschaft, 2000. isbn: 978-3528548841.
- [WE 1989] C. Wieckert und W. Egli. „Theoretical analysis of the current and energy flow to the anode in the diffuse vacuum arc“. In: *IEEE Transactions on Plasma Science* 17 (5 1989), Seiten 649–652. issn: 0093-3813.
- [Wie 1985] Christian Wieckert. „Der kathodische Plasma-Jet“. Dissertation. Universität Bochum, 1985.
- [Wol 2012] Christian Peter Wolf. „Experimentelle Untersuchung des Hochstrom-Vakuumbogens auf Transversal-Magnetfeld-Kontakten“. Dissertation. TU Braunschweig, 2012. isbn: 978-9-8439-0970-9.

Normen und technische Richtlinien

- [IEC 2003] IEC 62271-100. *High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: High-voltage alternating-current circuit-breakers*. IEC, 2003.

Eigene Publikationen

1. T. Rettenmaier, V. Hinrichsen, A. Lawall, J. Teichmann: *Investigations on Arc Rotation on Vacuum Circuit Breakers by External Magnetic Field Sensors*. ISH 2011 „International Symposium on High Voltage Engineering“, 22.-26. August 2011, Hannover, Germany. Tagungsband, ISBN 978-3-8007-3364-4.
2. T. Rettenmaier, V. Hinrichsen, A. Lawall, E. D. Taylor, J. Teichmann: *Investigations on Contact Erosion in Vacuum Circuit Breakers by Arc Rotation Measurements with External Magnetic Field Sensors*. ISDEIV 2012 „International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum“, 2.-7. September 2012, Tomsk, Russia, Tagungsband, ISBN 978-1-4673-1265-3.
3. T. Rettenmaier, V. Hinrichsen, A. Lawall, E. D. Taylor, J. Teichmann: *Dektion von Verschleißerscheinungen an Mittelspannungsvakuumschaltrohren durch die Messung der Lichtbogenbeweglichkeit mittels externer Magnetfeldsensoren*. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, 15.-16. November 2012, Fulda, Germany. Tagungsband, ISBN 978-3-8007-3465-8.
Gewinner des „ETG-Literaturpreises 2013“ sowie des „Diagnostik 2012 Best Paper Award“
4. T. Rettenmaier, V. Hinrichsen, E. D. Taylor: *Investigations on Arc Movement in Vacuum Interrupters by Arc Rotation Measurements with External Magnetic Field Sensors*. ISDEIV 2014 „International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum“, 28. September - 3. October 2014, Mumbai, India, Tagungsband, ISBN 978-1-4799-6751-3.

Betreute Diplom-, Master-, Studien- und Bachelorarbeiten

Folgende Diplom-, Master-, Studien- und Bachelorarbeiten wurden im Rahmen dieser Arbeit angefertigt und stellen Teil der hier gezeigten Ergebnisse dar:

- [Bra 2011] Bachelorarbeit Nr. 1850: „Simulation der Kräfteverhältnisse auf einen Schaltlichtbogen beim Ausschaltprozess eines RMF-Kontaktsystems“ (Florian Brabetz). Darmstadt, 2011.

- [Sch 2011] Bachelorarbeit Nr. 1858: „Modellierung eines elektromagnetischen Messsystems zur Erfassung der Lichtbogenbewegung in Vakuumleistungsschaltern“ (Marcel Schuck). Darmstadt, 2011.

- [Sch 2012] Bachelorarbeit Nr. 1885: „Aufbau eines Messsystems zur Untersuchung der Kontaktübergangswiderstände von Mittelspannungsvakuumschaltröhren in Abhängigkeit des Verschleißzustandes“ (Peter Schneider). Darmstadt, 2012.

- [Nee 2012] Bachelorarbeit Nr. 1887: „Aufbau eines magnetischen Messsystems zur Erfassung der Lichtbogenbewegung in Vakuumschaltröhren“ (Alexander Neeb). Darmstadt, 2012.

- [Elb 2013] Masterarbeit Nr. 1906: „Entwicklung und Aufbau eines Messsystems zur Untersuchung der Bewegungscharakteristik eines Metaldampflichtbogens in Mittelspannungsvakuumschaltröhren“ (Andreas Dean Elben). Darmstadt, 2013.

- [Puj 2014] Masterarbeit Nr. 1924: „Untersuchung der Erscheinungsformen sowie des Laufverhaltens von Schaltlichtbögen in kommerziellen Mittelspannungsvakuumleistungsschaltern“ (Elaine Pujervie). Darmstadt, 2014.
- [Son 2014] Masterarbeit Nr. 1925: „Simulation des Einflusses des Metaldampfschirmes sowie der Kontaktgeometrie auf das magnetische Außenfeld eines Mittelspannungsvakuumleistungsschalters“ (Bünyamin Sonuc). Darmstadt, 2014.
- [Wie 2014] Bachelorarbeit Nr. 1928: „Untersuchung der Kräfteverhältnisse auf einen Metaldampflichtbogen in kommerziellen Mittelspannungsvakuumschaltern“ (Tilman Wies). Darmstadt, 2014.
- [Bra 2014] Masterarbeit Nr. 1930: „Untersuchung der durch die Lichtbogenbewegung induzierten Wirbelströme auf das magnetische Außenfeld eines Vakuumleistungsschalters“ (Florian Brabetz). Darmstadt, 2014.

Lebenslauf

Thomas Frederik Rettenmaier
geboren am 12. April 1980
in Heidelberg



Werdegang

- | | |
|---------------------|--|
| Seit 01/2015 | Research Scientist in der zentralen Forschung bei der Siemens AG in Erlangen |
| 10/2009 bis 10/2014 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Hochspannungstechnik |
| 01/2009 bis 06/2009 | Diplomarbeit an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Stromrichtertechnik |
| 10/2001 bis 07/2009 | Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität Darmstadt |
| 10/2000 bis 07/2001 | Wehrdienst |
| 05/2000 | Erlangung der allgemeinen Hochschulreife (Abitur) am Carl-Bosch-Gymnasium in Heidelberg |

10. Juli 2015